



Apports des données radar pour l'estimation des paramètres biophysiques des surfaces agricoles

Rémy Fieuzal

► To cite this version:

Rémy Fieuzal. Apports des données radar pour l'estimation des paramètres biophysiques des surfaces agricoles. Sciences de la Terre. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2013. Français. NNT : . tel-01082960

HAL Id: tel-01082960

<https://theses.hal.science/tel-01082960>

Submitted on 7 Jan 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Toulouse III - Paul Sabatier
Discipline ou spécialité : Télédétection-Surfaces Continentales

Présentée et soutenue par FIEUZAL Rémy
Le 13 Décembre 2013

Titre : *Apports des données radar pour l'estimation des paramètres biophysiques des surfaces agricoles*

JURY

FERRO-FAMIL Laurent, Rapporteur
WIGNERON Jean-Pierre, Rapporteur
FRISON Pierre-Louis, Examineur
GASTELLU-ETCHEGORRY Jean Philippe, Examineur
BAUP Frédéric, Co-directeur
DUCROT Danielle, Co-directeur

Ecole doctorale : SDU2E
Unité de recherche : CESBIO
Directeur(s) de Thèse : BAUP Frédéric, DUCROT Danielle
Rapporteurs : FERRO-FAMIL Laurent, WIGNERON Jean-Pierre

à Pierre...

Remerciements

A la manière des 'grandes sagas', mon aventure au CESBIO s'est déroulée en 3 épisodes. Elle a débuté par un stage de fin d'études, s'est poursuivie par différentes interactions avec les projets thématiques du laboratoire, pour finir par une thèse. Au cours de cette période, j'ai eu la chance de travailler sur des sujets variés, échanger avec de nombreuses personnes, m'enrichissant autant scientifiquement, qu'humainement. Maintenant que la trilogie se termine, et avant je l'espère une suite, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont fait partie du casting.

Je tiens tout d'abord à remercier Yann Kerr, en tant que directeur du laboratoire, qui m'a accueilli au sein du CESBIO.

Je remercie également les deux rapporteurs de ma thèse, Laurent Ferro-Famil et Jean Pierre Wigneron, d'avoir accepté de lire attentivement mon manuscrit, et pour les précieux commentaires. Merci également aux autres membres du jury, Pierre-Louis Frison et Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry.

Merci à mes 3 'co-directeurs' de thèse, Danielle Ducrot, Armand Lopes et Frédéric Baup. Un grand merci à Fred, pour m'avoir fait confiance en acceptant ma candidature à son sujet de thèse, pour les défis lancés tout au long de cette période, pour les sorties sur le terrain les jours fériés (surtout s'il pleut toute la journée...), pour les échanges scientifiques, pour sa ténacité face à l'adversité, et bien d'autre..., bref, pour tous les souvenirs accumulés durant ces quelques années.

Merci à tous les membres du CESBIO, qu'ils soient titulaires, thésards ou stagiaires, avec qui j'ai pu échanger : Ahmad Albitar, Amirouche Benchallal, Guillaume Bigeard, Gilles Boulet, Vincent Bustillo, Marie Carles, Eric Ceschia, Jonas Chirouze, Martin Claverie, Benoit Coudert, Gérard Dedieu, Jean-Francois Dejoux, Valérie Demarez, Olivier Hagolle, Lionel Jarlan, Nathalie Jarosz, Pascal Keravec, Valérie Le Dantec, Delphine Leroux, Christine Lion, Claire Marais-Sicre, Jérôme Maubant, Arnaud Mialon, Benoit Mingam, Patrick Mordelet, Oliver Merlin, Yannick Philippets, Emilie Ribeiro, Vincent Rivalland, Yan Soldo, Vivien Stefan, Dramane Traoré, Lucho Villa, Mehrez Zribi (merci également à tous ceux que j'oublie...). Une mention particulière pour Benoit Duchemin, merci pour tes conseils, et tout ce que j'ai appris en travaillant à tes côtés...

Merci à toutes les personnes qui ont participé à la campagne expérimentale, au noyau dur de la 'team MCM' (une nouvelle fois, merci à Claire et Fred), comme aux personnes venues en dépannage, et qui ont toutes rendu l'aventure possible.

Enfin, une dernière pensée va vers ma famille, ma compagne qui m'a supporté durant cette période (et ce n'était pas toujours simple...), et ma fille qui m'a tenu éveillé.

Résumé

Les travaux de thèse s'inscrivent au sein du chantier Sud-Ouest, dont le principal objectif est de contribuer à la compréhension, et à la modélisation du fonctionnement des surfaces continentales, à l'échelle du paysage. Ces travaux visent à améliorer les capacités de suivi et d'analyses de surfaces fortement anthropisées : les agrosystèmes. A la fois acteurs et spectateurs vis-à-vis du changement climatique, ces surfaces sont également dédiées à la production alimentaire. La problématique vise donc à concilier durabilité des ressources et niveau de production suffisant, en identifiant des outils, comme la télédétection, utiles à la prise de décision à des échelles allant de la parcelle au territoire.

Dans ce contexte, les Radars à Synthèse d'Ouverture (RSO) embarqués au sein de satellites, présentent le double avantage d'être sensibles à différents paramètres des surfaces continentales (en lien avec le sol, ou la végétation), et la capacité d'observation par condition nuageuse (à l'inverse des capteurs opérant dans le visible). Depuis les années 90, différentes études basées sur des images acquises avec la technologie RSO ont montré l'intérêt des données micro-ondes pour le suivi des surfaces continentales. Ces dernières années, l'émergence de missions satellites dans les bandes de fréquence X et L vient enrichir les possibilités d'étude autrefois limitées à la seule bande C. Ces couples capteurs-satellites fournissent aujourd'hui des produits à haute résolution spatiale (allant jusqu'au mètre), avec des possibilités de revisite hebdomadaire, critères nécessaires pour le suivi des zones hétérogènes, associées à de fortes dynamiques temporelles.

Les travaux effectués dans le cadre de cette thèse visent à établir la complémentarité entre les données radars (TerraSAR-X, Radarsat-2 et Alos, dans les bandes spectrales X, C et L) et optiques (Formosat-2, Spot-4/5) acquises par satellites, pour le suivi des agrosystèmes. Ils s'articulent autour de trois axes complémentaires :

- Le premier consiste en la mise en œuvre d'une campagne expérimentale basée sur l'acquisition d'un jeu de données (satellitaire et de terrain), nécessaire au développement de nouvelles approches pour l'analyse du paysage. La zone suivie, caractérisée par une forte anthropisation, est située à 50 km au sud-ouest de Toulouse. Les images satellitaires regroupent trois séries temporelles radars (bandes X, C et L), auxquelles s'ajoutent des acquisitions réalisées dans l'optique (Formosat-2, Spot-4/5). Avec un total d'une centaine d'images acquises dans les hyperfréquences, la zone commune aux différentes scènes couvre une surface de 10×10 km². Conjointement, les protocoles de mesures de terrain ont permis de considérer de manière indépendante les deux éléments clés de la surface : le sol et la culture. En complément des stations météorologiques installées dans le cadre du chantier, des mesures qualitatives et quantitatives ont été réalisées de manière synchrone avec les acquisitions satellites, sur un total de 387 parcelles. Cinq cultures sont principalement étudiées : le blé, le colza, le tournesol, le maïs et le soja.
- Les signatures temporelles de chacune des cultures sont ensuite établies à chaque longueur d'onde d'acquisition satellitaire (optique et radar) à travers une approche originale de normalisation angulaire des signaux radars (combinaison de l'information radar et optique). Les résultats obtenus durant le cycle phénologique des cultures d'hiver (blé et colza) et d'été (maïs, soja et tournesol) montrent clairement la complémentarité des approches multi-capteurs, et la spécificité des signaux radars (en lien avec les états de polarisations et les fréquences considérées). Deux paramètres biophysiques relatifs à la végétation sont enfin estimés (indice foliaire et hauteur), les données micro-ondes montrant à la fois une importante sensibilité et de bonnes performances.
- La modélisation électromagnétique sur sol nu a tout d'abord permis d'évaluer différents formalismes, à savoir : les modèles de Dubois et d'Oh (1992 et 2004) ayant comme caractéristiques communes une description simplifiée des processus. Ils sont confrontés à un modèle reposant sur des bases physiques, le modèle IEM (Integral Equation Model). L'application des modèles dans les différentes bandes spectrales (X, C et L), montre des résultats très hétérogènes, les meilleures performances étant obtenues en bande X, avec le modèle d'Oh 1992. Par la suite, l'amélioration des modèles tire parti de l'analyse des résidus (vis-à-vis des variables d'entrée), afin de réduire la dispersion observée. Les modèles testés sont optimisés et validés selon une approche de type résidus. Une forte amélioration est observée pour la plupart des modèles.

Les résultats mettent en évidence l'intérêt des données multi-capteurs pour le suivi des surfaces dédiées à l'agriculture. Dans un futur proche, les missions spatiales telles que Tandem-X, Sentinel-1/-2, Radarsat Constellation ou Alos-2 devraient pérenniser l'accès à ces données, et préciser ainsi les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse.

Abstract

The thesis fall within the “SudOuest” project, whose main objective is to contribute to the understanding and the modeling of the land surface functioning, at the landscape scale. This work aims to improve the capacity of monitoring and analysis of highly anthropic surfaces: agrosystems. Both actors and audience to climate change, these surfaces are also dedicated to the food production. So the problem is to reconcile sustainability of resources and sufficient level of production, identifying tools, such as remote sensing, useful in making decision at scales ranging from plot to land.

In this context, the Synthetic Aperture Radar (SAR) embedded in satellites have the twofold advantages of being sensitive to different parameters of the land surface (related to soil, and vegetation), and the ability to observe by cloudy condition (unlike sensors operating in the visible). Since the 90s, several studies based on images acquired with SAR technology have shown the interest of microwave data for the monitoring of land surface. In recent years, the emergence of satellite missions at X- and L-bands enriches study opportunities once only limited to the C-band. These sensor/satellite couples now provide products with high spatial resolution (up to a meter), with the possibility of weekly revisits, necessary criteria for the monitoring of heterogeneous areas associated with high temporal dynamics.

Works done in this thesis aim to establish the complementarities between the radar (TerraSAR-X, Radarsat-2 and Alos, at X-, C- and L-bands) and optical data (Formosat-2, Spot-4/-5) acquired by satellites for the monitoring of agrosystems. They revolve around three complementary areas:

- The first is the implementation of an experimental campaign based on the acquisition of a set of data (satellite and ground), necessary for the development of new approaches to landscape analysis. The studied area, characterized by a strong human impact, is located near Toulouse (at 50 km in the South West). Satellite images include three radar time series acquired at X-, C- and L-bands, and images acquired in the optical (Formosat-2, Spot-4/-5). With a total of one hundred images acquired in the microwave domain, the common area to the different scenes covering a region of 10×10 km². Together, the protocols used for field measurements consider independently the two key elements of the surface: the soil and the culture. In addition to the weather stations (part of the “SudOuest” project), qualitative and quantitative measurements are performed synchronously with the satellite acquisitions, on a total of 387 plots. Five crops are mainly studied: wheat, rapeseed, sunflower, corn and soybean.

- The temporal signatures of these crops are then established for each satellite wavelength (optical and radar), through an original approach based on an angular normalization of radar signals (combining the optical and radar information). The results obtained during the phenological cycle of winter (wheat and rapeseed) and summer crops (corn, soybean and sunflower) clearly show the complementarity of multi-sensor approaches and the specificity of radar signals (associated with the considered polarization states and frequencies). Two biophysical parameters related to vegetation are finally estimated (leaf area index and height), the microwave data showing both high sensitivity and good performances.

- The electromagnetic modeling of bare soil is first used to evaluate different formalisms, namely Dubois and Oh (1992 and 2004) models, with common characteristics, a simplified description of the process. They are confronted with a model based on the physical laws, the IEM (Integral Equation Model). The application of models in different spectral bands (X, C and L), shows very mixed results; the best performances are obtained at X-band with Oh 1992 model. Thereafter, the enhancement of the models takes advantage of the residue analysis (as a function of the input variables), to reduce the observed dispersion. The tested models are optimized and validated using an approach such residues. A significant improvement is observed for most models.

The results highlight the interest of multi-sensor data for the monitoring of continental surfaces dedicated to agriculture. In the near future, satellite missions such as Tandem -X, Sentinel-1/-2, Radarsat Constellation or Alos-2 should sustain access to these data, and define the results obtained in this thesis.

Table des matières

Remerciements	5
Résumé	7
Abstract	9
Table des matières	11
Liste des figures.....	14
Liste des tableaux	20
INTRODUCTION GENERALE	21
CHAPITRE I : Campagne expérimentale - Multispectral Crop Monitoring'10	29
1. INTRODUCTION	30
2. LE SITE D'ETUDE	32
3. LES ACQUISITIONS SATELLITES MULTI-CAPTEURS	37
3.1. Les images radar.....	39
3.1.1. Généralités.....	39
3.1.2. Les résolutions spatiales	40
3.1.3. Les déformations géométriques des images SAR.....	42
3.1.4. Le Chatoiement	43
3.1.5. L'équation du radar	44
3.1.6. Propriétés et traitements des données SAR utilisées	45
3.2. Les images optiques	50
3.2.1. Les images Spot-4/5 et Formosat-2	50
3.2.2. Extraction des indices de végétation.....	51
3.3. Bilan des acquisitions satellites multi-capteurs	52
4. LES MESURES DE TERRAIN.....	54
4.1. Humidité de surface	54
4.1.1. Etalonnage des sondes portables	54
4.1.2. Suivi spatio-temporel de l'humidité de surface	57
4.1.3. Synchronisation des mesures avec les acquisitions satellites	61
4.2. Rugosité du sol.....	64
4.2.1. Protocole de mesure	64
4.2.2. Traitement des données	65
4.2.3. Analyses des résultats.....	66
4.3. Texture et pierrosité	69
4.3.1. Protocole de mesure	70
4.3.2. Analyse des résultats	71
4.4. Caractérisation de la végétation	74
4.4.1. Sensibilité des signaux SAR à la végétation.....	74
4.4.2. Analyse des résultats	80
4.5. Bilan de la collecte des mesures terrain	87

5. CONCLUSION	89
CHAPITRE II : Suivi des cultures par télédétection radar - Complémentarité avec les images optiques	91
1. INTRODUCTION	92
2. NORMALISATION ANGULAIRE DES SIGNAUX SATELLITES RADAR.....	94
2.1. Sensibilité des coefficients de rétrodiffusion à l'angle d'incidence	94
2.1.1. En période de sol nu	94
2.1.2. En période de végétation	96
2.2. Méthode de normalisation des coefficients de rétrodiffusion.....	100
2.3. Mise en place de la normalisation angulaire	101
2.3.1. Approche empirique	101
2.3.2. Impacts de la normalisation sur le signal radar.....	104
2.4. Bilan de la normalisation angulaire.....	105
3. SIGNATURES TEMPORELLES RADAR ET OPTIQUE DES CULTURES	106
3.1. Apports des différentes fréquences	106
3.1.1. Suivi des cultures pluviales d'hiver (colza et blé)	106
3.1.2. Suivi des cultures irriguées d'été (maïs et soja)	113
3.1.3. Suivi d'une culture pluviale d'été (tournesol)	119
3.1.4. Bilan	121
3.2. Apports des différentes polarisations pour le suivi des cultures saisonnières	122
3.2.1. Suivi des cultures pluviales d'hiver.....	122
3.2.2. Suivi des cultures irriguées d'été.....	125
3.2.3. Suivi d'une culture pluviale d'été.....	128
3.2.4. Bilan	129
4. COMPARAISON DE LA SENSIBILITE DES DONNEES SATELLITES AUX PARAMETRES DES CULTURES.....	130
4.1. Estimation du LAI et de la hauteur des cultures pluviales d'hiver	134
4.2. Estimation du LAI et de la hauteur des cultures irriguées d'été	138
4.3. Estimation du LAI et de la hauteur d'une culture pluviale d'été.....	142
5. CONCLUSION	145
CHAPITRE III : Evaluation et amélioration des modèles de rétrodiffusion radar de sol nu	147
1. INTRODUCTION	148
2. DESCRIPTION DES MODELES DE RETRODIFFUSION	150
2.1. Modèles semi-empiriques.....	150
2.1.1. Le modèle d'Oh et al., 1992	150
2.1.2. Le modèle d'Oh et al., 2004	151
2.1.3. Le modèle de Dubois et al., 1995	152
2.2. Modèle physique	153
2.2.1. Integral Equation Model.....	153
2.2.2. Calibration semi-empirique du modèle IEM	154
2.3. Sensibilité des modèles	155

3. METHODES D'EVALUATION ET D'AMELIORATION DES MODELES DE RETRODIFFUSION	157
4. EVALUATION DES MODELES DE RETRODIFFUSION	159
4.1. Résultats de modélisation en bande X.....	159
4.1.1. Performances des modèles.....	159
4.1.2. Analyse des résidus	163
4.2. Résultats de modélisation en bande C.....	169
4.2.1. Performances des modèles.....	169
4.2.2. Analyse des résidus	172
4.3. Résultats de modélisation en bande L	177
4.3.1. Performances des modèles.....	177
4.3.2. Analyse des résidus	180
5. AMELIORATION DES MODELES.....	184
5.1. Résultats en bande X.....	185
5.2. Résultats en bande C	188
5.3. Résultats en bande L	190
6. CONCLUSION.....	192
CONCLUSION GENERALE	195
Références Bibliographiques.....	199
Valorisations Scientifiques	207
1. Articles en lien avec les thématiques de la thèse.....	207
1.1. Articles publiés :.....	207
1.2. Actes étendus :	207
2. Articles en coopération avec d'autres projets	208
2.1. Articles publiés :.....	208
2.2. Acte étendu :	208
3. Autres valorisations scientifiques	208
3.1. Présentations avec acte :.....	208
3.2. Posters avec acte :	209
3.3. Posters :	210

Liste des figures

Figure 1 : Répartition de la production mondiale de blé en 2010 (basée sur les données fournies par la FAO).	25
Figure 2 : Répartition de la production mondiale de maïs en 2010 (basée sur les données fournies par la FAO).	26
Figure 3 : Répartition de la production mondiale de soja en 2010 (basée sur les données fournies par la FAO).	26
Figure 4 : Répartition de la production mondiale de colza en 2010 (basée sur les données fournies par la FAO).	27
Figure 5 : Répartition de la production mondiale de tournesol en 2010 (basée sur les données fournies par la FAO).	28
Figure 6 : Localisation de la région d'étude au Sud-Ouest de la France, montrant les trois échelles d'étude (échelle méso, super-site et les deux sites locaux d'Auradé et de Lamasquère). Au sein du super-site, les 387 parcelles servant à la collecte des données, sont présentées sur le modèle numérique de terrain (fourni par l'IGN).	32
Figure 7 : Diagrammes ombrothermiques pour l'année 2010. Températures moyennes de l'air (en rouge) et cumuls mensuels des précipitations (en bleu) issus des données des stations d'Auradé et de Lamasquère.	33
Figure 8 : Classification de l'occupation du sol basée sur une approche multi-temporelle et des images Spot. Cinq classes sont distinguées : cultures, forêts, prairies, zones urbaines et lacs (classification réalisée par Marais-Sicre en 2010).	33
Figure 9 : Calendrier cultural des principales cultures de la région d'étude.	34
Figure 10 : Illustrations des techniques d'irrigation rencontrées dans la zone d'étude : canon a), sprinklers b), pivot c).	34
Figure 11 : Exemples de conditions de surface observés après un travail du sol : labour a), disquage b), et semis c).	35
Figure 12 : Dispositif expérimental mis en œuvre lors de la campagne MCM'10.	36
Figure 13 : Spectre électromagnétique et transmittance de l'atmosphère depuis l'espace. (Richards, 2008)	37
Figure 14 : Effet des précipitations sur la propagation des micro-ondes. (Richards, 2008).	38
Figure 15 : Principe de fonctionnement des capteurs SAR.	39
Figure 16 : Bandes de fréquence en télédétection radar.	39
Figure 17 : Axes et résolutions radiales et azimutales d'un instrument radar (Maitre, 2001).	40
Figure 18 : Antenne synthétique des capteurs SAR.	41
Figure 19 : Déformation géométrique des images.	43
Figure 20 : Image TerraSAR-X originelle a), et après application d'un filtre de Lee (fenêtre spatiale de 10×10 pixels) b).	43
Figure 21 : Histogrammes des coefficients de rétrodiffusion d'une parcelle avant a) et après application du filtre de Lee (fenêtre spatiale de 10×10 pixels) b). La valeur moyenne des pixels est indiquée par le point noir (~8.67dB).	44
Figure 22 : Représentation des modes de fonctionnement Stripmap a) et Spotlight b).	46
Figure 23 : Chronogramme des acquisitions effectuées par TerraSAR-X (TS-X), avec les modes Stripmap (SM) et Spotlight (SL). Les valeurs numériques en gris correspondent aux angles d'incidence. Les orbites descendantes sont indiquées par les figurés blancs, les ascendantes en noir. Les polarisations HH et VV sont respectivement représentées par des triangles et des ronds.	46
Figure 24 : Surfaces communes partagées par les images TerraSAR-X (en modes Stripmap, a), et Spotlight, b)) focalisées sur le super site.	47
Figure 25 : Chronogramme des acquisitions RADARSAT-2 (RS-C) effectuées en mode Fine Quad-polarization. Les valeurs numériques en gris correspondent aux angles d'incidence. Les orbites descendantes et ascendantes sont respectivement indiquées par les figurés blancs et noirs.	48
Figure 26 : Surfaces communes partagées par les images Radarsat-2 (mode Fine Quad-polarization), focalisées sur le super site (pointillés blancs).	48
Figure 27 : Chronogramme des acquisitions ALOS (AP-L) effectuées en modes Fine Beam Single (FBS) et Dual (FBD) à 38.7° d'incidence	49
Figure 28 : Surfaces communes partagées par les images Alos (modes Fine Beam Single et Dual), focalisées sur le super site (pointillés blancs).	49
Figure 29 : Chronogramme des acquisitions Spot-4, Spot-5 et Formosat-2.	50
Figure 30 : Surfaces communes partagées par les images Spot-4/5 et Formosat-2, focalisées sur le super site (pointillés blancs).	50
Figure 31 : Bilan du nombre d'images satellites acquises au cours de l'année 2010, à plus ou moins un jour. Pour les images radars, les couleurs verte, bleue claire et bleue foncée, correspondent à la présence d'une, deux ou trois fréquences. Le nombre cumulé d'images optique et radar est représenté en noir.	53

Figure 32 : Bilan des couvertures spatiales communes des produits satellites sur la zone d'étude (en pointillés). Pour les images radar, les couleurs rouge, verte, magenta et bleue correspondent aux zones communes aux images Alos, Radarsat-2, et TerraSAR-X en mode SM et SL. Les zones communes aux images Spot et Formosat-2 sont représentées en noir.	53
Figure 33 : Sonde portable ML2x de chez ThetaProbe avec son boîtier d'enregistrement.	55
Figure 34 : Lois d'étalonnage des sondes ThetaProbe déterminées sur les 8 parcelles étalons. Les différentes formes des figurés correspondent aux dates de mesure, alors que les couleurs sont associées à la densité apparente (g.cm^{-3}).	56
Figure 35 : Evolutions temporelles de l'humidité de surface du sol (moyenne (+), et écarts types (en gris)), des précipitations mesurées à Lamasquère et de l'évapotranspiration potentielle (ET_0), a), ainsi que des coefficients de variation, b).	58
Figure 36 : Evolutions temporelles de l'humidité de surface (+), des précipitations et de la hauteur de la culture, au sein de trois parcelles à l'occupation du sol contrastées : blé a), maïs b) et soja c). Pour chaque parcelle, les valeurs d'humidité moyennes (mesurées le long du transect) sont encadrées des écarts types. Evolutions temporelles des coefficients de variation correspondant, d), e) et f).	59
Figure 37 : Exemples d'évolution de l'humidité de surface le long de transects, au sein des parcelles D, K et N.	60
Figure 38 : Evolutions temporelles des humidités mesurées et corrigées des effets du décalage temporel entre acquisition satellite et collecte terrain. Les couleurs distinguent les acquisitions précédant (en vert) et suivant (en bleu) les mesures terrain, les satellites étant associés à différents figurés (▼ et ▲ pour TerraSAR-X, ● pour Radarsat-2 et ■ pour Alos).	62
Figure 39 : Comparaison entre les valeurs d'humidité de surface mesurées, et celles corrigées du décalage temporel pour les acquisitions réalisées par les satellites TerraSAR-X, Radarsat-2 et Alos.	63
Figure 40 : Paramètres statistiques (R^2 et RMSE) illustrant la comparaison entre les valeurs d'humidité mesurées, et celles corrigées du décalage temporel, pour les 37 parcelles suivies.	63
Figure 41 : Photographies du rugosimètre à aiguille réalisées sur quatre états de rugosité : préparé motteux a), déchaumé b), travaillé c), et labouré d).	65
Figure 42 : Relation entre h_{rms} et l_c , estimées à partir des profils parallèles a) et perpendiculaires b) de rugosité.	67
Figure 43 : Nombre de parcelles échantillonnées au cours de l'année 2010.	67
Figure 44 : Exemples d'évolutions temporelles de la rugosité de surface (h_{rms} et l_c) des parcelles AJ et A1. Concernant la hauteur quadratique moyenne, les figurés en pointillé correspondent à la prise en compte de l'érosion sur le paramètre h_{rms}	68
Figure 45 : Relations entre la permittivité diélectrique et le contenu en eau pour 5 types de sol, à des fréquences de 1,4 GHz, 5 GHz, et 10 GHz (Hallikainen et al., 1985).	69
Figure 46 : Technique de prélèvement des échantillons de texture.	70
Figure 47 : Histogrammes des fractions d'argile a), de limon b), et de sable c), des 146 prélèvements de texture du sol.	71
Figure 48 : Estimation de la pierrosité de surface le long des transects ayant servi aux mesures de l'humidité de surface.	72
Figure 49 : Projection des mesures de texture de surface sur la classification USDA. Les figurés noir correspondent aux prélèvements où les pF ont été estimés.	72
Figure 50 : Principaux mécanismes de diffusion sur un couvert végétal (Ulaby et al., 1984)	75
Figure 51 : Sensibilité à l'humidité de surface tracée en fonction de la fréquence à différents angles d'incidence (mesurée sur différents couverts : maïs, soja, alfalfa et milo), d'après Ulaby et al. 1979.	75
Figure 52 : Réponses angulaires des coefficients de rétrodiffusion acquis à 4,25 GHz en conditions sèche et humide sur des cultures de blé, maïs et soja. (Ulaby et al. 1979)	76
Figure 53 : Evolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C, en polarisation HH et VV, à des angles d'incidence de 23 et 40°, sur une culture de blé. (Mattia et al 2003)	77
Figure 54 : Evolutions temporelles des signaux radar (gamma en polarisation VV a), et coefficients de rétrodiffusion b)) acquis en bande X, sur une culture de blé, d'après Bouman et al 1992 et Mingquan et al 2012.	78
Figure 55 : Stratification verticale de la végétation, cas du blé.	80
Figure 56 : Evolutions temporelles de la hauteur et des stades phénologiques des cultures de blé a), colza b), maïs c), soja d) et tournesol e). Les valeurs moyennes de hauteur sont bornées par les valeurs minimales et maximales observées.	81
Figure 57 : Evolutions temporelles de la biomasse aérienne des cultures de blé a), colza b), maïs c), soja d) et tournesol e).	83
Figure 58 : Evolutions temporelles des distributions verticales de la biomasse fraîche et de l'humidité relative, des cultures de blé a), colza b), maïs c), soja d) et tournesol e).	85
Figure 59 : Réponses angulaires des coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisation HH, avec des fréquences de 1,1 et 7,25 GHz, en conditions sèche (a, b) et humide (c et d). (Ulaby et al., 1978)	95

Figure 60 : Réponses angulaires des coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisation HH, VV et HV, à des fréquences de 1,5 GHz, en condition lisse (h_{rms} de 0,32 cm a)), et 9,5 GHz en condition rugueuse (h_{rms} de 3,02 cm b)). (Oh et al., 1992)	96
Figure 61 : Réponses angulaires des coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisation HH, avec des fréquences de 1,5 et 4,25 GHz, en conditions sèche et humide, pour des cultures de soja (a et c) et de blé (b et d). (Ulaby et al., 1979)	96
Figure 62 : Réponses angulaires des coefficients de rétrodiffusion acquis à une fréquences de 5,9 GHz, en co- et cross-polarisation, sur des cultures de soja (a) et de maïs (b). (Ulaby, 1975).....	97
Figure 63 : Réponses angulaires des coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisations HH et VV, à une fréquence de 5,3 GHz, sur une culture de blé : avant (a et b) et après (c et d) épiaison. (Mattia et al., 2003)	97
Figure 64 : Coefficients de rétrodiffusion tracés en fonction des angles d'incidence, pour la bande L (le 22 mars a), et le 4 juillet b)) et la bande C (le 24 mars c), et le 4 juillet d)), avec la polarisation VV, sur des cultures de blé, d'orge et de colza. (Skriver et al., 1999).....	98
Figure 65 : Coefficients de rétrodiffusion tracés en fonction des angles d'incidence (30°, 40° et 50°), en bandes C (a) et L (b), en polarisation VV, sur des cultures de blé et de colza, aux jours 131 et 186. (Balenzano et al., 2011)	98
Figure 66 : Réponses angulaires des coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisations HH (a) et VV (b), à une fréquence de 9,89 GHz, lors du développement de la culture d'okra. (Prasad 2009).....	99
Figure 67 : Signaux rétrodiffusés (gamma, correspondant au rapport des coefficients de rétrodiffusion par le cosinus de l'angle d'incidence, soit $\sigma^0/\cos\theta$) acquis à 20, 50 et 70°, durant différents stades de développement des cultures de blé a), d'orge b) et d'avoine c), en bande X, avec la polarisation VV. (Bouman et Van Kasteren, 1990).....	99
Figure 68 : Relations empiriques entre le NDVI et la différence entre les coefficients de rétrodiffusion ($\Delta\sigma^0$, exprimée en dB par degré, dB.° ⁻¹). Pour chacune des cultures (colza a), blé b), maïs c), soja d) et tournesol e)), les résultats en bande X (avec la polarisation HH) sont présentés en gris. Concernant la bande C, les relations sont présentées en noir avec des figurés relatifs aux différentes polarisations.....	102
Figure 69 : Valeurs des coefficients de détermination et des erreurs relatives associées aux relations empiriques établies pour la normalisation angulaire des coefficients de rétrodiffusion.....	103
Figure 70 : Evolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes X et C (en polarisation HH), avant (en noir) et après (en gris) normalisation angulaire, pour les cinq cultures suivies (colza a), blé b), maïs c), soja d) et tournesol e)). Les lignes verticales grises et les lettres 'S' et 'R' indiquent les dates de semis et de récolte.	104
Figure 71 : Illustration de l'évolution de la culture de colza pour différentes périodes : a) premiers stades phénologiques (05/03/2010), b) début de la floraison (08/04/2010), c) sénescence et inclinaison de la végétation (11/06/2010), d) chaumes après récolte (02/07/2010).	106
Figure 72 : Illustration de l'évolution de la culture de blé pour différentes périodes : a) premiers stades phénologiques (20/02/2010), b) épiaison (20/05/2010), c) végétation sénescence avec des zones de verse (02/07/2010), d) chaumes après récolte (17/08/2010).	107
Figure 73 : Evolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes X, C et L, (polarisation HH), pour le colza. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales ainsi que la lettre R indiquent la date (ou période) de récolte.	108
Figure 74 : Evolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes X, C et L, (polarisation HH), pour le blé. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales ainsi que la lettre R indiquent la date (ou période) de récolte.	110
Figure 75 : Illustration de l'évolution de la culture de maïs pour différentes périodes : a) début de la période d'émergence après semis (20/05/2010), b) début de la floraison (29/07/2010), c) sénescence (07/10/2010), d) résidus de culture après récolte (22/10/2010).	113
Figure 76 : Illustration de l'évolution de la culture de soja pour différentes périodes : a) émergence de la végétation (11/06/2010), b) développement maximal de la végétation (30/08/2010), c) début de sénescence de la végétation (15/09/2010), d) végétation avant la récolte (22/09/2010).	113
Figure 77 : Evolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes X, C et L, (polarisation HH), pour le maïs. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales et les lettres S et R indiquent les dates (ou périodes) de semis et de récolte.	114
Figure 78 : Evolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes X, C et L, (polarisation HH), pour le soja. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont également présentés. Les lignes verticales et les lettres S et R indiquent les dates de semis et de récolte.	117

Figure 79 : Illustration de l'évolution de la culture de tournesol pour différentes périodes : a) début de la période d'émergence après semis (20/05/2010), b) début de la floraison (02/07/2010), c) fin de la sénescence avant récolte (30/08/2010), d) état de la surface après récolte et travail de la surface du sol (07/10/2010).	119
Figure 80 : Evolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes X, C et L, (polarisation HH), pour le tournesol. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales et les lettres S et R indiquent les dates (ou périodes) de semis et de récolte.	120
Figure 81 : Évolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C (σ_{VH}^0 et σ_{VHVV}^0), pour le colza. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales ainsi que la lettre R indiquent la date (ou période) de récolte.	122
Figure 82 : Évolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C (σ_{VV}^0 et σ_{HHVV}^0), pour le blé. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales ainsi que la lettre R indiquent la date (ou période) de récolte.	124
Figure 83 : Évolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C (σ_{VH}^0 et σ_{HHVV}^0), pour le maïs. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). Les périodes d'irrigation sont matérialisées par les rectangles gris. La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales grises et les lettres S et R indiquent les dates (ou périodes) de semis et de récolte.	125
Figure 84 : Évolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C (σ_{VV}^0 et σ_{VH}^0), pour le soja. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont également présentés. Les périodes d'irrigation sont matérialisées par les rectangles gris. Les lignes verticales et les lettres S et R indiquent les dates de semis et de récolte.	127
Figure 85 : Évolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C (σ_{VH}^0 et σ_{VV}^0), pour le tournesol. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). La période d'irrigation est matérialisée par le rectangle gris. La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales grises et les lettres S et R indiquent les dates (ou périodes) de semis et de récolte.	128
Figure 86 : Relations entre la hauteur de la canne à sucre, et les coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes X, C et L.(Baghdadi et al., 2009).....	131
Figure 87 : Relations entre les coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes L et C, sur des cultures de tournesol, maïs et sorgho a), et sur du blé et alfalfa b).	132
Figure 88 : Relation entre l'indice foliaire et les coefficients de rétrodiffusion acquis en bande X sur du blé.	132
Figure 89 : Relation entre les coefficients de rétrodiffusion, acquis en bande C, et l'indice foliaire du blé.	133
Figure 90 : Relations empiriques entre l'indice foliaire du colza a) et du blé b), et les coefficients de rétrodiffusion, $\sigma_{C-HV/HH}^0$ et σ_{X-HH}^0 respectivement.	134
Figure 91 : Bilan des performances statistiques associées aux relations empiriques entre le LAI du colza a) et du blé b), et les signaux satellites. Les valeurs maximales d'indice foliaire, ainsi que le niveau de saturation, sont indiqués au-dessus des indicateurs statistiques, en noir et gris respectivement.	135
Figure 92 : Relations empiriques entre la hauteur du colza et les signaux satellites, NDVI a) et $\sigma_{C-HV/HH}^0$ b).....	135
Figure 93 : Relations empiriques entre la hauteur du blé et les signaux satellites, NDVI a) et σ_{X-HH}^0 b).....	136
Figure 94 : Bilan des performances statistiques associées aux relations empiriques entre la hauteur du colza a) et du blé b), et les signaux satellites. Les valeurs maximales de hauteur, ainsi que le niveau de saturation, sont indiqués au-dessus des indicateurs statistiques, en noir et gris respectivement.	137
Figure 95 : Relations empiriques entre l'indice foliaire du maïs (a) et du soja (b), et les coefficients de rétrodiffusion, σ_{C-VH}^0	138
Figure 96 : Bilan des performances statistiques associées aux relations empiriques entre le LAI du maïs a) et du soja b), et les signaux satellites. Les valeurs maximales d'indice foliaire, ainsi que le niveau de saturation, sont indiqués au-dessus des indicateurs statistiques, en noir et gris respectivement.	139
Figure 97 : Relations empiriques entre la hauteur du maïs et les signaux satellites, NDVI a) et σ_{C-VH}^0 b).....	139
Figure 98 : Relations empiriques entre la hauteur du soja et les signaux satellites, NDVI a) et σ_{C-VH}^0 b).....	140

Figure 99 : Bilan des performances statistiques associées aux relations empiriques entre la hauteur du maïs a) et du soja b), et les signaux satellites. Les valeurs maximales de hauteur, ainsi que le niveau de saturation, sont indiqués au-dessus des indicateurs statistiques, en noir et gris respectivement.	141
Figure 100 : Relations empiriques entre l'indice foliaire du tournesol, et les coefficients de rétrodiffusion, σ^0_{C-HH}	142
Figure 101 : Bilan des performances statistiques associées aux relations empiriques entre le LAI du tournesol, et les signaux satellites. Les valeurs maximales d'indice foliaire, ainsi que le niveau de saturation, sont indiqués au-dessus des indicateurs statistiques, en noir et gris respectivement.	143
Figure 102 : Relations empiriques entre la hauteur du tournesol et les signaux satellites, NDVI (a) et σ^0_{C-HH} (b).	143
Figure 103 : Bilan des performances statistiques associées aux relations empiriques entre la hauteur du tournesol, et les signaux satellites. Les valeurs maximales de hauteur, ainsi que le niveau de saturation, sont indiqués au-dessus des indicateurs statistiques, en noir et gris respectivement.	144
Figure 104 : Domaine de validité du modèle IEM, en fonction des paramètres relatifs à la rugosité (kh_{rms} et k_{lc}).	154
Figure 105 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion simulés par les modèles d'Oh 1992 (\blacktriangle), Oh 2004 (\blacktriangledown), Dubois (\bullet) et IEM (+), en bandes X a), C b) et L c), pour deux niveaux d'humidité contrastés (faible en rouge et fort en noir).	156
Figure 106 : Descriptif de la procédure d'évaluation et d'amélioration des modèles de rétrodiffusion radar de sol nu.	157
Figure 107 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus des images satellites TerraSAR-X (bande X, polarisation HH), à ceux simulés par les modèles d'Oh (1992 a), et 2004 b)), de Dubois c) et au modèle IEM (originel d) et optimisé e)). Les figurés noirs et bleus distinguent les simulations dans et hors domaine de validité des modèles.	161
Figure 108 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus des images satellites TerraSAR-X (bande X, polarisation HH), à ceux simulés par les modèles d'Oh 2002 a), de Dubois b) et au modèle IEM c). (Baghdadi et al., 2011b)	162
Figure 110 : Résidus du modèle d'Oh 1992 en bande X, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité, de la texture (teneurs en argile et en sable), et de l'angle d'incidence.	163
Figure 109 : Résidus du modèle d'Oh 1992 tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.	163
Figure 112 : Résidus du modèle d'Oh 2004 en bande X, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité et de l'angle d'incidence.	165
Figure 111 : Résidus du modèle d'Oh 2004 tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.	165
Figure 114 : Résidus du modèle de Dubois en bande X, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité, de la texture (teneurs en argile et en sable), et de l'angle d'incidence.	166
Figure 113 : Résidus du modèle de Dubois tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.	166
Figure 116 : Résidus du modèle IEM en bande X, tracés en fonction des paramètres relatifs à la rugosité (hauteur quadratique moyenne et longueur de corrélation), à l'humidité de surface, à la texture (teneur en argile et en sable), et à l'angle d'incidence.	167
Figure 115 : Résidus du modèle IEM tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.	167
Figure 118 : Résidus du modèle IEM optimisé en bande X, tracés en fonction des paramètres relatifs à la rugosité (hauteur quadratique moyenne et longueur de corrélation), à l'humidité de surface, à la texture (teneur en argile et en sable), et à l'angle d'incidence.	168
Figure 117 : Résidus du modèle IEM optimisé tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.	168
Figure 119 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus des images satellites Radarsat-2 (bande C, polarisation HH), à ceux simulés par les modèles d'Oh (1992 a), et 2004 b)), de Dubois c) et au modèle IEM (originel d) et optimisé e)). Les figurés noirs et bleus distinguent les simulations dans et hors domaine de validité des modèles.	171
Figure 121 : Résidus du modèle d'Oh 1992 en bande C, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité, de la texture (teneurs en argile et en sable), et de l'angle d'incidence.	172
Figure 120 : Résidus du modèle d'Oh 1992 tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.	172
Figure 123 : Résidus du modèle d'Oh 2004 en bande C, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité, et de l'angle d'incidence.	173
Figure 122 : Résidus du modèle d'Oh 2004 tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.	173
Figure 125 : Résidus du modèle de Dubois en bande C, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité, de la texture (teneurs en argile et en sable), et de l'angle d'incidence.	174
Figure 124 : Résidus du modèle de Dubois tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.	174
Figure 127 : Résidus du modèle IEM en bande C, tracés en fonction des paramètres relatifs à la rugosité (hauteur quadratique moyenne et longueur de corrélation), à l'humidité de surface, à la texture (teneur en argile et en sable), et à l'angle d'incidence.	175
Figure 126 : Résidus du modèle IEM tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.	175

Figure 129 : Résidus du modèle IEM optimisé en bande C, tracés en fonction des paramètres relatifs à la rugosité (hauteur quadratique moyenne et longueur de corrélation), à l'humidité de surface, à la texture (teneur en argile et en sable), et à l'angle d'incidence.	176
Figure 128 : Résidus du modèle IEM optimisé tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.....	176
Figure 130 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus des images satellites Alos (bande L, polarisation HH), à ceux simulés par les modèles d'Oh (1992 a), et 2004 b)), de Dubois c) et au modèle IEM d). Les figurés noirs et bleus distinguent les simulations dans et hors domaine de validité des modèles.....	179
Figure 132 : Résidus du modèle d'Oh 1992 en bande L, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité, et de la texture (teneurs en argile et en sable).....	180
Figure 131 : Résidus du modèle d'Oh 1992 tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.	180
Figure 134 : Résidus du modèle d'Oh 2004 en bande L, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, et de l'humidité	181
Figure 133 : Résidus du modèle d'Oh 2004 tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.	181
Figure 136 : Résidus du modèle de Dubois en bande L, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité, et de la texture (teneurs en argile et en sable).....	182
Figure 135 : Résidus du modèle de Dubois tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.	182
Figure 138 : Résidus du modèle IEM en bande L, tracés en fonction des paramètres relatifs à la rugosité (hauteur quadratique moyenne et longueur de corrélation), à l'humidité de surface, et à la texture (teneur en argile et en sable).	183
Figure 137 : Résidus du modèle IEM tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.	183
Figure 139 : Exemples de comportements des résidus pris en compte pour la modification des modèles semi-empiriques (cas du modèle d'Oh 1992).....	185
Figure 140 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus des images satellites TerraSAR-X (bande X, polarisation HH), à ceux simulés par les modèles d'Oh (1992 a), et 2004 b)) et de Dubois c). Les figurés gris et noir distinguent respectivement les simulations réalisées avec les versions initiales et optimisées.	186
Figure 141 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus des images satellites Radarsat-2 (bande C, polarisation HH), à ceux simulés par les modèles d'Oh (1992 a), et 2004 b)) et de Dubois c). Les figurés gris et noir distinguent respectivement les simulations réalisées avec les versions initiales et optimisées.	189
Figure 142 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus des images satellites Alos (bande L, polarisation HH), à ceux simulés par les modèles d'Oh (1992 a), et 2004 b)) et de Dubois c). Les figurés gris et noir distinguent respectivement les simulations réalisées avec les versions initiales et optimisées.....	190

Liste des tableaux

Tableau 1 : Nombre de parcelles et paramètres collectés lors de la campagne de mesure. Concernant le suivi de la biomasse, une parcelle par culture est échantillonnée (voir section 4.4.2).	35
Tableau 2 : Résultats des comparaisons des indices NDVI et MTVI2 dérivés des images acquises par Spot-4, Spot-5 et Formosat-2.	52
Tableau 3 : Répartition de la taille des particules du sol en fonction des classes considérées par le laboratoire « Lara Europe Analyses ».	71
Tableau 4 : Nombre de parcelles suivies lors de la campagne de mesure.	79
Tableau 5 : Valeurs des paramètres (a, b et c) utilisés pour les relations empirique de normalisation angulaire. Chaque culture et chaque cas de configuration d'antenne sont évalués par des paramètres statistiques (erreurs quadratiques moyennes absolue et relative, et coefficients de détermination).	103
Tableau 6 : Domaine de validité du modèle d'Oh 1992.	151
Tableau 7 : Domaine de validité du modèle d'Oh 2004.	152
Tableau 8 : Domaine de validité du modèle de Dubois.	153
Tableau 9 : Performances statistiques associées à la mise en œuvre des différents modèles en bande X (en polarisation HH). Les simulations sont effectuées sur la base de différents ensembles de données (E ₁ à E ₄). Les paramètres relatifs à la droite de régression sont notés a et b.	160
Tableau 10 : Performances statistiques associées à la mise en œuvre des différents modèles en bande C (en polarisation HH). Les simulations sont effectuées sur la base des différents ensembles de données (E ₁ à E ₄). Les paramètres relatifs à la droite de régression sont notés a et b.	170
Tableau 11 : Performances statistiques associées à la mise en œuvre des différents modèles en bande L (en polarisation HH). Les simulations sont effectuées sur la base des différents ensembles de données (E ₁ à E ₄). Les paramètres relatifs à la droite de régression sont notés a et b.	178
Tableau 12 : Récapitulatif des comportements pris en compte dans la modification des modèles semi-empiriques (O pour oui, N pour non).	184
Tableau 13 : Performances statistiques associées à la mise en œuvre des différents modèles en bande X (en polarisation HH), avant et après optimisation (respectivement en gris et noir). L'évaluation est basée sur les échantillons ayant servi à la détermination des corrections (E _{APP}), ou indépendant (E _{VAL}).	186
Tableau 14 : Comparaison des domaines de validité obtenus pour les modèles initiaux et optimisés.	187
Tableau 15 : Performances statistiques associées à la mise en œuvre des différents modèles en bande C (en polarisation HH), avant et après optimisation (respectivement en gris et noir). L'évaluation est basée sur les échantillons ayant servi à la détermination des corrections (E _{APP}), ou indépendant (E _{VAL}).	188
Tableau 16 : Comparaison des domaines de validité obtenus pour les modèles initiaux et optimisés.	189
Tableau 17 : Performances statistiques associées à la mise en œuvre des différents modèles en bande L (en polarisation HH), avant et après optimisation (respectivement en gris et noir).	190
Tableau 18 : Comparaison des domaines de validité obtenus pour les modèles initiaux et optimisés.	191

INTRODUCTION GENERALE

L'agriculture est un secteur d'activité où les exploitants aménagent un milieu naturel, afin d'obtenir différents produits (végétaux et animaux). Les problématiques en lien avec ce secteur sont multiples, avec des enjeux alimentaires, économiques, écologiques et sociétaux. Au niveau mondial, ces enjeux sont renforcés par l'augmentation de la démographie (avec un taux d'accroissement actuel de 1,1%), et une population qui pourrait atteindre 9,3 milliards d'individus à l'horizon 2050, selon les projections fournies par l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, <http://faostat.fao.org/>).

Les produits agricoles, qu'ils soient bruts ou issus de l'industrie agro-alimentaire, s'échangent à l'échelle mondiale en quantité variable selon le pays et le produit considérés. En 2010 par exemple, les Etats-Unis d'Amérique et la France étaient leaders concernant les exportations de blé, avec des quantités dépassant les 20 millions de tonnes (source FAO). A l'opposé, l'Egypte arrivait en tête des pays importateurs, avec plus de 10 millions de tonnes. Ces échanges entre pays peuvent en outre être favorisés par la mise en place de politiques particulières, comme la Politique Agricole Commune (PAC) à l'échelle de l'Union Européenne, qui vise entre autre à la stabilité des marchés, par le biais de subventions. Un tel flux de produits agricole oblige de plus en plus les décideurs politiques à reconsidérer les méthodes de production, avec la prise en compte des enjeux environnementaux inhérents aux exploitations.

Une bonne gestion de l'appareil de production passe par le non gaspillage des ressources, et notamment des engrais et des pesticides, afin de limiter les effets de l'activité sur l'écosystème, et d'assurer la pérennité de l'ensemble de la Surface Agricole Utile (SAU). A l'échelle globale, cette SAU atteint près d'un tiers des surfaces émergées (estimées à 15 milliards d'hectares), avec environ 10% dédiées aux cultures (soit 1,4 milliards d'hectares en 2010). Cette surface allouée aux cultures est consommatrice d'une quantité d'eau importante, distribuée principalement sous forme d'irrigation, et plus ou moins marquée selon les endroits de la planète. Une culture comme le blé par exemple, nécessite plusieurs irrigations sous un climat semi-aride (cas du Maroc ou du Mexique), alors que l'apport d'eau n'est pas obligatoire en milieu tempéré (en France par exemple). A l'inverse, sous ce climat, l'utilisation d'espèces se développant durant les mois les plus chauds (telles que le maïs ou le soja), nécessite des apports réguliers et importants d'eau.

Les conséquences environnementales d'une mauvaise gestion de ces différentes ressources sont multiples. Elles peuvent être irréversibles, et entraîner la destruction des sols, la salinisation des terres, l'assèchement des nappes phréatiques, ou diverses pollutions. L'abandon de ces terres devenues impropres à l'agriculture, est en partie compensé par la déforestation (générant de nouveaux problèmes écologiques). Cette problématique environnementale est renforcée par le contexte global de changement climatique, qui se traduit par une hausse des températures, et des modifications des régimes de précipitations (Dore, 2005).

Dans ce contexte, une gestion efficace des agrosystèmes nécessite de développer des méthodes de suivi et d'analyse des paysages agricoles, tout en identifiant des mesures d'adaptation appropriées aux changements (Falloon and Betts 2010; Olesen and Bindi 2002; Olesen et al., 2011). Les agrosystèmes ont par ailleurs des incidences directes ou indirectes sur les différents bilans de surface (carbone, azote, eau ou d'énergie), en lien avec les pratiques culturales (labour, engrais, irrigation et gestion des résidus) (Ceschia et al., 2010; Claverie et al., 2012; Hansen and Djurhuus, 1997; Ward et al., 2012). De plus, en raison de leur forte dynamique spatio-temporelle (différences de culture, de pratique agricole, de climat...), les agrosystèmes sont très difficiles à renseigner à l'échelle d'une commune, d'une région ou d'un pays. Il paraît donc difficilement envisageable de faire un suivi global des cultures sur la base de mesures de terrain, comme ce peut être le cas à l'échelle d'une parcelle agricole. En raison de leur grande capacité de couverture (plusieurs kilomètres carrés) et de revisite temporelle, les satellites de télédétection semblent être des outils bien adaptés pour pallier à cette difficulté d'observation (Bastiaanssen et al., 2000; Kalluri et al., 2003; Seelan et al., 2003).

Les études basées sur l'utilisation de données satellites de télédétection sont logiquement tributaires des missions en cours. Or durant près de 20 ans, seules les données satellites délivrées dans les domaines du visible et de l'infra-rouge étaient accessibles. La série des satellites Landsat débutait ainsi en 1972, et fournissait les premiers produits avec une résolution compatible avec l'étude des surfaces hétérogènes (quelques dizaines de mètres). Concernant les données issues de capteurs micro-ondes, les premières missions satellites (avec des produits acquis à haute résolution spatiale) débutaient en 1991, avec ERS-1. Par la suite, de nouvelles missions ont pérennisé l'offre disponible en bande C (avec par exemple ERS-2, Envisat ou Radarsat-1). Au cours des années 2000, les missions TerraSAR-X et Alos sont venues compléter la gamme des capteurs disponibles, avec des images délivrées en bandes X et L. Ces bandes de fréquences étaient jusque là principalement réservées aux capteurs embarqués lors de missions aéroportées (à l'exception du satellite JERS qui fonctionna de 1992 à 1998). Durant la période 2007-2013, il était donc envisageable d'explorer le potentiel des images hyperfréquences, avec des satellites imageurs radar fonctionnant en bandes X, C et L, dont un des avantages est d'être très peu perturbés par les conditions atmosphériques (Ulaby et al., 1981).

Dans le domaine des micro-ondes, de nombreuses études ont été menées grâce à des mesures effectuées par des antennes au sol, des campagnes aéroportées ou des missions spatiales (ERS-1/2, Envisat, Radarsat-1/2 et autres). Elles portent sur la sensibilité aux paramètres de surface, vis-à-vis de l'angle d'incidence, de la fréquence ou de la polarisation, en condition de sol nu, ou en présence de végétation. Les nombreux résultats obtenus sur sols nus montrent une sensibilité marquée du coefficient de rétrodiffusion aux variations de niveaux d'humidité, de rugosité, et de texture (Dobson and Ulaby, 1981; Le Hegarat-Masclé et al., 2002; McNairn et al., 2012; Ulaby et al., 1978; Ulaby et al., 1979; Zribi et al., 2005a; Zribi et al., 2005b). Les résultats obtenus sur la

végétation sont beaucoup plus difficiles à généraliser, en particulier pour les agrosystèmes où les conditions de surface évoluent très rapidement. La majeure partie des études bibliographiques portent sur des données acquises au cours de stades phénologiques spécifiques, à l'échelle locale (Balenzano et al., ; Brown et al., 2003a; Ulaby et al., 1979). Il est souvent difficile de généraliser le comportement du signal radar sur l'ensemble du cycle de culture, en particulier à l'échelle du paysage, où les conditions de surface peuvent être contrastées. Aucune étude ne traite à la fois d'un grand nombre de parcelles agricoles et de différentes espèces, à l'aide de données satellitaires acquises durant l'intégralité d'un cycle cultural.

Dans le cadre de cette thèse, il est envisagé de développer une nouvelle approche d'étude des agrosystèmes, en combinant des images satellites issues de plusieurs capteurs radars et optiques, et des données de terrain collectées en même temps que les images. L'ensemble de ces mesures s'effectuant sur les cycles quasi-complets des cultures d'intérêt (de l'émergence à la récolte). Le travail s'inscrit dans le cadre du chantier « Sud-Ouest » du laboratoire *CESBIO* (Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère), et de l'Observatoire Spatial Régional (*OSR*) labélisé en 2007 par l'Institut National des Sciences de l'Univers (*INSU*) (<http://www.cesbio.ups-tlse.fr/>).

Les approches mises en œuvre dans ce chantier combinent l'expérimentation de terrain, la télédétection, et la modélisation, en s'appuyant fortement sur un réseau de partenaires agricoles important (association d'agriculteurs, chambre d'agriculture...)

Les cinq principales cultures étudiées dans le cadre du chantier, et lors de ces travaux de thèse (à savoir le blé, le colza, le tournesol, le maïs et le soja), sont présentées en quelques chiffres dans les paragraphes suivants, à travers leur représentativité aux échelles locales, nationales et internationales, soulignant l'importance de leur étude. Les données sont issues de la *FAO* (<http://faostat.fao.org/>), du ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt (Agreste, <http://agreste.agriculture.gouv.fr/>), et du Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains (*CETIOM*, <http://www.cetiom.fr/>).

En 2010, **la culture de blé** s'étendait sur quelques 217 millions d'hectares à l'échelle mondiale, faisant du blé la première culture concernant la surface occupée (la quatrième en termes de quantité produite). Sa principale utilisation concerne l'alimentation humaine et animale. Depuis les années 60, cette superficie oscille entre 204 et 239 millions d'hectares, les valeurs maximales étant observées au cours du début des années 80. Durant la même période, à savoir de 1961 à 2010, l'amélioration des rendements permet une augmentation de la production, passant de 222 à 652 millions de tonnes. En 2010, cinq pays produisaient plus de la moitié du blé mondial (51,9%). Leader avec près de 17,7% de la production, la Chine était suivie par l'Inde (12,4%), les Etats-Unis d'Amérique (9,2%), la Russie (6,4%) et la France (6,3%) (Figure 1). Cette culture est néanmoins présente dans une majorité de pays.

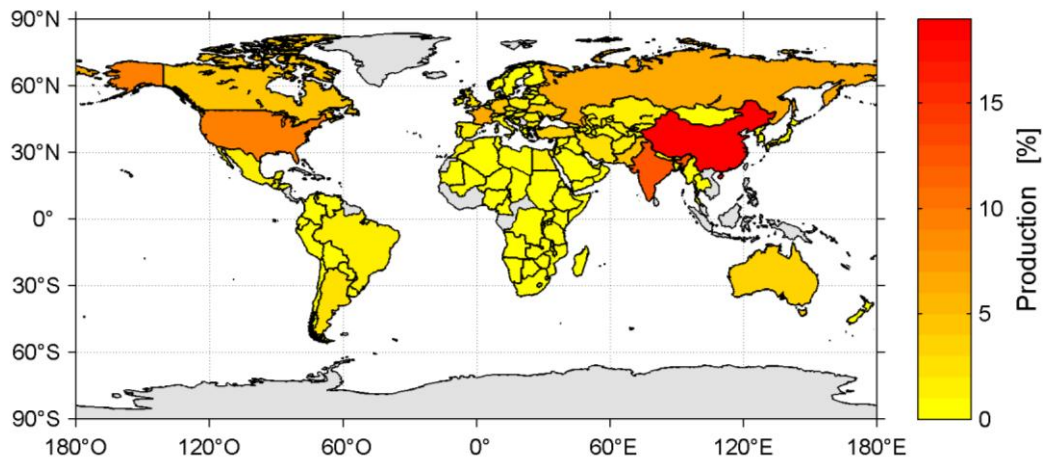


Figure 1 : Répartition de la production mondiale de blé en 2010 (basée sur les données fournies par la FAO).

En France, la culture de blé occupait la surface record de 5,9 millions d’hectares en 2010, soit près de 20% de la SAU. Première culture à l’échelon national, la production avoisinait les 41 millions de tonnes (quantité record depuis 1961), avec un rendement moyen proche de 69 quintaux par hectare. Excédentaire vis-à-vis des besoins du pays, la France exportait près de la moitié de la production (soit 21 millions de tonnes), au cours de la même année. La région Midi-Pyrénées présentait des rendements de 54 et 58 quintaux par hectare, concernant respectivement le blé dur et le blé tendre.

La **culture de maïs** est principalement destinée à l’alimentation animale, même si elle entre également dans l’alimentation humaine dans des proportions très variables selon les pays considérés. Avec 164 millions d’hectares cultivés au niveau mondial, le maïs constituait la deuxième culture en termes de surface (derrière le blé), pour l’année 2010. Au cours de la période 1961-2010, l’augmentation des rendements, passant de 19 à 52 quintaux par hectare, et de la surface cultivée (avec près de 60 millions d’hectares), expliquent la hausse de la production. Durant les cinquante dernières années, cette production est ainsi passée de 205 à 850 millions de tonnes, faisant du maïs la deuxième culture mondiale au vu de la production (derrière la canne à sucre). Les Etats-Unis d’Amérique et la Chine étaient les principaux pays producteurs, fournissant plus de la moitié de la quantité de maïs (58,1% plus exactement). La France se positionnait au huitième rang mondial, avec moins de 2% de la production mondiale (Figure 2). Cette culture est également exploitée dans un grand nombre de pays.

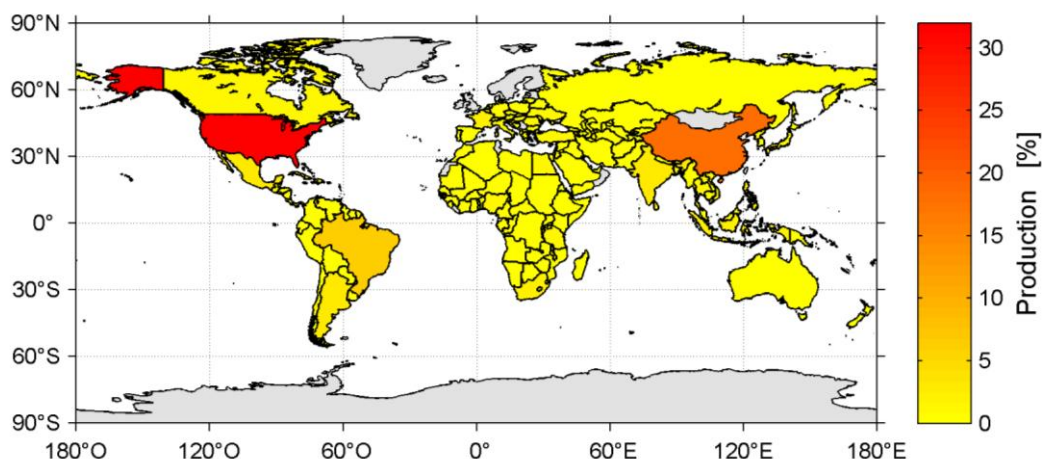


Figure 2 : Répartition de la production mondiale de maïs en 2010 (basée sur les données fournies par la FAO).

En France, la production de maïs s'élevait en 2010, à 14 millions de tonnes, valeur supérieure aux besoins nationaux. Les excédents constituaient un total de 6,6 millions de tonnes, vendues à l'exportation. Avec une valeur moyenne de 88 quintaux par hectare, l'année 2010 présentait des rendements conformes à la moyenne des dix dernières années. La culture occupait 1,6 millions d'hectare, soit 5,5% de la SAU. Dans la région Midi-Pyrénées, les rendements de maïs irrigué s'élevaient à 100 quintaux par hectare, contre 71 pour le maïs grain sec.

A l'échelle mondiale, le soja représentait en 2010 la quatrième culture en termes de surface, avec un total proche de 103 millions d'hectares. Les **graines de soja** et leurs dérivés sont consommés sous différentes formes dans l'alimentation humaine (huile, farine, lait, tofu...). Produits annexes de la trituration des graines, les tourteaux de soja entrent dans l'alimentation animale, pour leur forte teneur en protéine. Années après années, la surface allouée à cette culture n'a cessé d'augmenter, elle était par exemple de 24 millions d'hectares, en 1961. Les principaux pays producteurs étaient tous localisés sur le continent Américain, avec en tête les Etats-Unis, suivi du Brésil et de l'Argentine. Ces trois pays fournissaient en 2010, 80% de la production mondiale de soja, sur un total de 265 millions de tonnes (soit la sixième culture, au vu de la quantité produite). Avec seulement 136 745 tonnes produites au cours de la même année, la France se situait au 28^{ème} rang mondial (Figure 3).

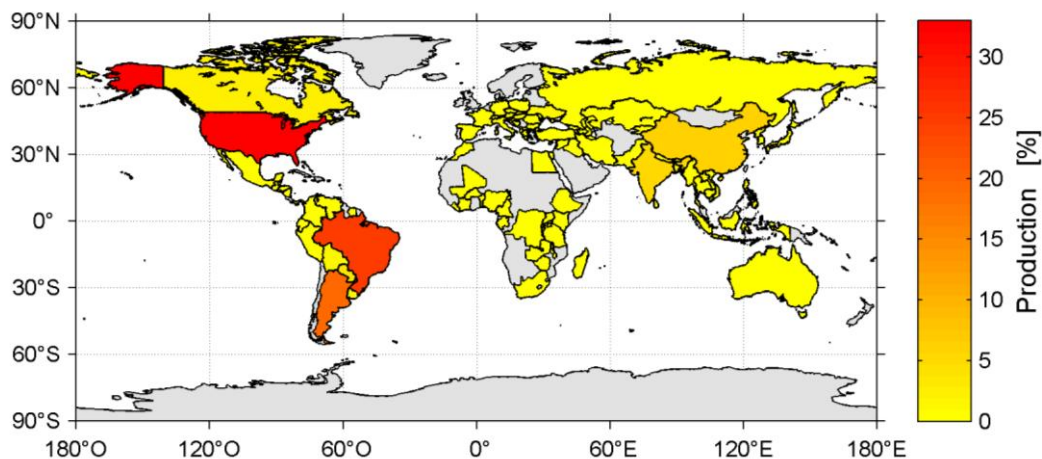


Figure 3 : Répartition de la production mondiale de soja en 2010 (basée sur les données fournies par la FAO).

Au cours de la période 2000-2010, la production nationale de soja variait entre 63 106 et 309 694 tonnes, et n'assurait qu'une partie des besoins (compensés par les importations). Avec 27 quintaux par hectare en moyenne nationale, les rendements observés au cours de l'année 2010 se situaient dans la partie haute des dix dernières années (rendements compris entre 18 à 29 quintaux par hectare, sur la période 2000-2010). Le sud de la France voyait son rendement osciller entre 30 et 35 quintaux par hectare.

En constante augmentation au cours des cinquante dernières années, la surface allouée à **la culture de colza** a atteint 32 millions d'hectares en 2010, faisant du colza la huitième culture à l'échelon mondial. Cette superficie était proche de 6 millions d'hectares, en 1961. Cette culture, utilisée dans l'alimentation humaine (sous la forme d'huile) et animale (tourteaux), voit s'élargir son champ d'utilisation, avec le développement des agro-carburants renouvelables. Les trois principaux pays producteurs, à savoir : la Chine, le Canada et l'Inde, fournissaient plus de la moitié de la production mondiale (54,1%), qui s'élevait à 60 millions de tonnes. Avec 8% de la production mondiale (soit 4,8 millions de tonnes), la France se situait au cinquième rang mondial. Cette culture n'est pas aussi bien représentée que les cultures précédentes à l'échelle internationale (Figure 4).

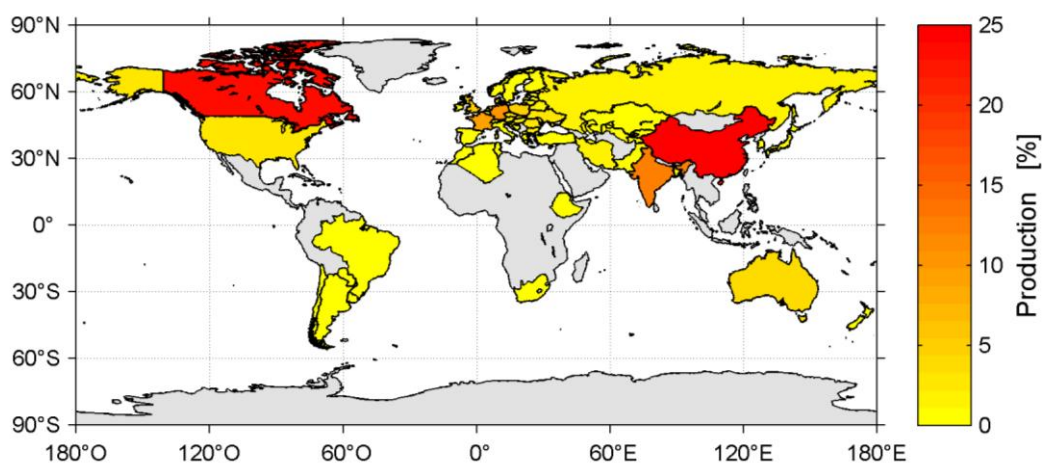


Figure 4 : Répartition de la production mondiale de colza en 2010 (basée sur les données fournies par la FAO).

Au niveau national, le colza constituait la quatrième culture en termes de surface, avec 1,5 millions d'hectares cultivés (soit 5,2% de la SAU), valeur proche de la superficie maximale observée lors de l'année 2007. La tendance à l'augmentation, observée au niveau mondial, est également constatée à l'échelon national. La surface allouée au colza n'était que de 70 176 hectares, en 1961. Au cours de la période 2000-2010, les rendements variaient entre 27 et 38 quintaux par hectares à l'échelle nationale, l'année 2010 présentant une valeur proche de la moyenne décennale, avec 32 quintaux par hectare. De forts contrastes étaient observés dans la région Midi-Pyrénées, avec des rendements allant de 18 à 40 quintaux par hectare, avec une moyenne de 27 quintaux par hectare.

A l'échelle mondiale, le **tournesol** constituait en 2010, la treizième culture en termes de surface cultivée, avec un total de 23 millions d'hectares. Utilisé dans l'alimentation humaine sous la forme d'huile, la plante entre dans l'alimentation animale sous la forme de tourteaux, ou de fourrage (lorsque la plante entière est récoltée avant maturité). L'huile peut être utilisée comme agro-carburant, comme précédemment dans le cas du colza. Pays leaders du point de vue de la production, l'Ukraine et la Russie produisaient près de 40% des stocks (38,5%), qui s'élevaient à un total de 31 millions de tonnes (Figure 5). Avec une production nettement inférieure, de 1,6 millions de tonnes (soit 5,2% de la production mondiale), la France se plaçait au cinquième rang mondial.

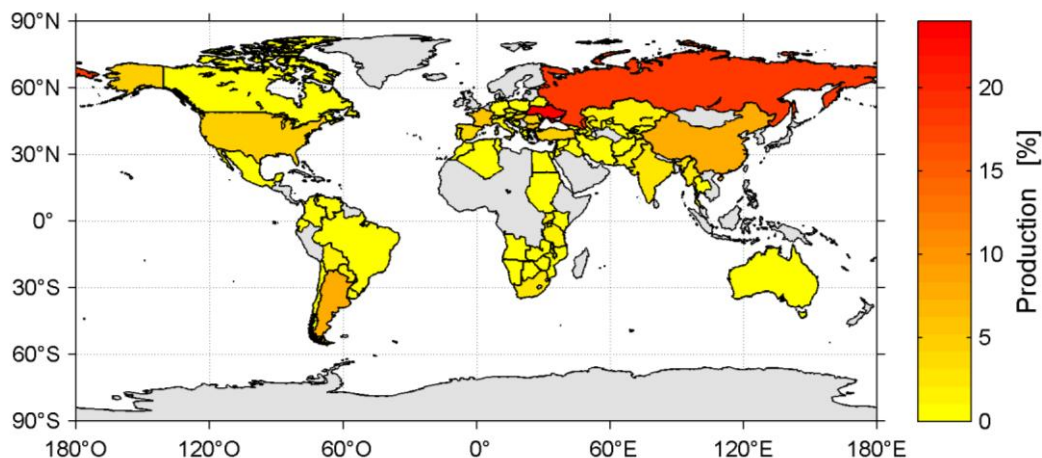


Figure 5 : Répartition de la production mondiale de tournesol en 2010 (basée sur les données fournies par la FAO).

Au niveau national, le tournesol occupait près de 692 265 hectares, soit 2,4% de la SAU, lors de l'année 2010. Cette surface s'inscrit dans la moyenne observée au cours des années post 2000, mais en net recul par rapport aux années 90 (surface moyenne proche de 931 000 hectares). Les rendements se situaient dans la moyenne des 10 dernières années, avec 24 quintaux par hectare. Dans la région Midi-Pyrénées, les rendements observés étaient proches de la moyenne nationale, ils oscillaient entre 22 et 26 quintaux par hectare.

Dans ce contexte, l'objectif général des travaux présentés dans cette thèse est d'évaluer l'apport des données satellites radar, acquises par TerraSAR-X, Radarsat-2 et Alos (dans les bandes spectrales X, C et L), en complément des données optiques (Formosat-2, Spot-4/5), pour le suivi de cinq cultures (blé, colza, soja, tournesol et maïs). Le rapport s'articule autour de trois axes complémentaires :

- Le premier consiste en la mise en œuvre d'une campagne expérimentale, nécessaire à la constitution d'une base de données (satellitaire et de terrain) utilisée pour le développement de nouvelles approches pour l'analyse des cultures (Chapitre I).
- Le second vise à analyser la sensibilité des données radar durant la période végétative, et à estimer différents paramètres des cultures (Chapitre II).
- Le troisième concerne la modélisation électromagnétique du sol nu, en lien avec les pratiques agricoles (semis, labour...). Différents modèles sont tout d'abord évalués, puis améliorés (Chapitre III).

CHAPITRE I : Campagne expérimentale - Multispectral Crop Monitoring'10

1. INTRODUCTION

La campagne expérimentale Multispectral Crop Monitoring (*MCM'10*, Baup et al., 2012, <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/fr/mcm.html>) s'est déroulée entre février et novembre 2010, sur la zone d'étude du chantier « Sud-Ouest » du CESBIO (situé près de Toulouse, en France), où deux stations climatiques sont implantées. Durant cette période, le site d'étude connaît de fortes variations des états de surface, qui sont associées au développement des cultures saisonnières.

La campagne expérimentale *MCM'10* a pour objectif l'étude des signaux satellitaires acquis dans différentes longueurs d'onde (optique, thermique et radar) pour le suivi des agrosystèmes, en vue de l'estimation des paramètres de surface (sol et végétation), et de leur assimilation dans des modèles agro-météorologiques. Deux catégories de produits satellitaires sont considérés lors de cette campagne expérimentale : ceux acquis à haute résolution spatiale (contexte de la thèse), et ceux acquis à basse résolution (SMOS, AMSR-E, ASCAT...hors contexte de la thèse).

L'expérimentation de terrain, nécessaire à la validation des approches satellitaires, s'appuie sur les connaissances de la zone d'étude acquises dans le cadre de l'Observatoire Spatial Régional (*OSR*, Dejoux et al. 2012), auprès des exploitants, et des acteurs impliqués dans la gestion des surfaces agricoles. Ces connaissances générales, acquises sur le moyen terme (quelques années), sont par ailleurs complétées par différentes expériences scientifiques de courte durée, à travers des approches multi-échelles (de la parcelle au paysage) (mesures de flux Béziat et al., 2009, Tallec et al., 2013, humidité du sol Baup et al., 2010, occupation du sol Ducrot et al., 2010).

La spécificité de la campagne *MCM'10* réside dans sa durée exceptionnellement longue (10 mois), et les problématiques qu'elle soulève :

- Etablir un plan de programmation contraint par des acquisitions satellites qui doivent être effectuées au plus proche les unes des autres (entre différentes plateformes),

- Dépointer les antennes radars pour assurer la couverture d'une même zone géographique,
- Echantillonner l'ensemble du cycle phénologique de différentes cultures,
- Anticiper les mesures de terrain pour chaque acquisition théorique d'image,
- Mettre en place des protocoles de mesure adaptés à chaque produit satellitaire,
- Echantillonner une large gamme de culture, de sol, et de technique agricole.

Ce chapitre est organisé de la manière suivante : la section 2 présente les principales caractéristiques de la zone d'étude, et le dispositif expérimental mis en place. Les sections suivantes traitent respectivement des données satellites et terrains. La section 3 fait une synthèse des images acquises par les différents capteurs (à haute résolution), et présente le principe de fonctionnement des capteurs SAR utilisés en télédétection. La section 4 présente les protocoles mis en œuvre pour l'acquisition des mesures de terrain, ainsi que les principaux résultats associés. Les aspects sol et végétation sont considérés indépendamment. Une synthèse de la base de données est finalement effectuée en conclusion de ce chapitre.

2. LE SITE D'ETUDE

La zone d'étude, baptisée super-site (Figure 6), se situe en France, dans la région Midi-Pyrénées, à une trentaine de kilomètres au Sud-Ouest de Toulouse. Centré sur les coordonnées : 43°29'36''N, 01°14'14''E, le super-site s'étend sur une surface proche de 420 Km², incluant deux stations météorologiques à proximité des villages d'Auradé et de Lamasquère. Le paysage est caractéristique des terrasses de la Garonne, avec la présence de coteaux et de plaines alluviales. Le relief est peu marqué à l'intérieur du super-site, avec toutefois un contraste Est-Ouest. Les parcelles sont plates à l'Est, avec des pentes majoritairement inférieures à 1°. Le relief est plus marqué à l'Ouest, avec des pentes moyennes voisines des 4,5°. Les parcelles ont des formes et des tailles très variables, avec des surfaces comprises entre 1 et 95 hectares (10 hectares en moyenne sur la zone). Le paysage est très découpé. Il résulte de l'évolution des activités agricoles depuis le Moyen Age (Latouche, 1967), et des remembrements successifs.

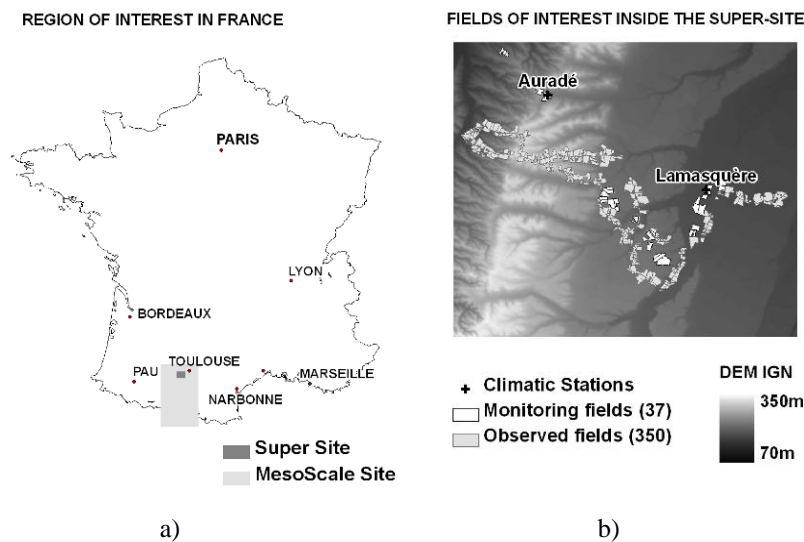


Figure 6 : Localisation de la région d'étude au Sud-Ouest de la France, montrant les trois échelles d'étude (échelle méso, super-site et les deux sites locaux d'Auradé et de Lamasquère). Au sein du super-site, les 387 parcelles servant à la collecte des données, sont présentées sur le modèle numérique de terrain (fourni par l'IGN).

Le site d'étude est soumis à un climat tempéré, caractérisé par une saisonnalité marquée. Les diagrammes ombrothermiques réalisés à partir des données enregistrées à Auradé et Lamasquère présentent peu de différences (Figure 7). Au cours de l'année 2010, le cumul annuel des pluies dépasse les 600 mm (608 mm pour Lamasquère, et 638 mm pour Auradé). Le mois de mai enregistre 20 % des précipitations annuelles, et contraste avec les mois d'avril, d'août et de décembre où moins de 25 mm sont enregistrés. Concernant les températures, une amplitude proche des 20°C est observée entre hiver et été. Les valeurs moyennes extrêmes sont observées durant les mois de janvier avec 3,5°C et de juillet avec 22°C.

Au sein du super-site, les conditions météorologiques agrégées mensuellement présentent peu de variabilité. Toutefois, à des échelles temporelles plus courtes (journalière), des différences notables sont observées. Ainsi, les précipitations collectées sur les deux stations présentent des différences vis-à-vis de la durée des épisodes pluvieux et des quantités enregistrées (variabilité spatiale entre l'Est et l'Ouest du super-site).

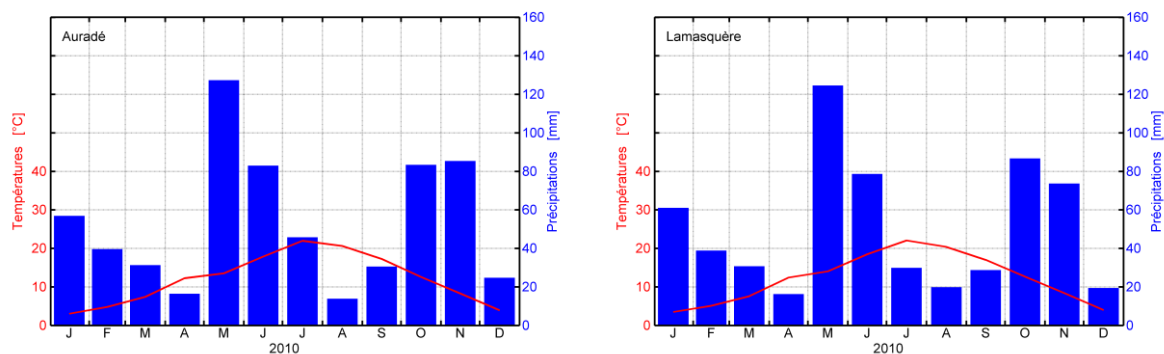


Figure 7 : Diagrammes ombrothermiques pour l'année 2010. Températures moyennes de l'air (en rouge) et cumuls mensuels des précipitations (en bleu) issus des données des stations d'Auradé et de Lamasquière.

La zone d'étude est fortement anthropisée, les surfaces étant majoritairement dédiées aux activités agricoles. La classification de l'occupation des sols, basée sur une série d'images Spot (dix images acquises au cours de l'année 2010) (Figure 8), montre ainsi que 56,8% de surfaces sont allouées aux cultures saisonnières. Avec 32,1%, les prairies représentent une part importante du paysage. Elles servent de zones de pâture, ou sont comptabilisées comme « zones de gel » par les exploitants agricoles. 7,9% des terres sont occupées par des forêts, et 2,4% par des zones urbaines. Enfin, la classe « lac » couvre uniquement 0,8% de la surface, et sert directement ou indirectement pour l'irrigation des cultures (hormis certaines gravières situées à l'Est de la zone). Au final, les activités agricoles occupent près de 90% du paysage.

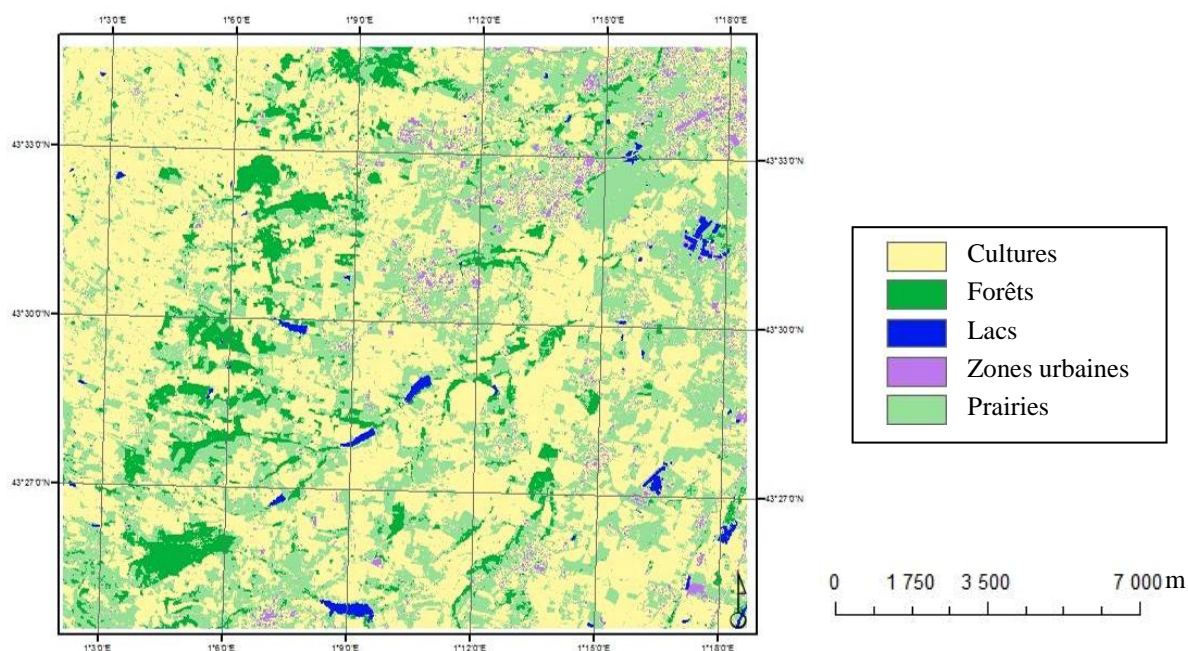


Figure 8 : Classification de l'occupation du sol basée sur une approche multi-temporelle et des images Spot. Cinq classes sont distinguées : cultures, forêts, prairies, zones urbaines et lacs (classification réalisée par Marais-Sicre en 2010).

Les cultures saisonnières sont regroupées en deux grandes classes, à savoir cultures d'été et d'hiver, en fonction de leur période de développement (Figure 9). Les cultures d'été sont semées au printemps. La récolte s'échelonne entre la fin de l'été et l'automne. Elles sont principalement représentées par le maïs et le tournesol, avec respectivement 11% et 25%. Le soja, le sorgho et le chanvre sont également cultivés durant cette même

période, ils représentent environ 5% des surfaces cultivées. Concernant les cultures d'hiver, elles sont semées au cours de la période comprise entre les mois de septembre et décembre. Elles sont récoltées durant les mois de juin et de juillet. Elles sont majoritairement représentées par le colza, le blé (dur et tendre) et l'orge, avec respectivement 5%, 44% et 4%. Durant cette période, les pois et les fèves sont également cultivés.

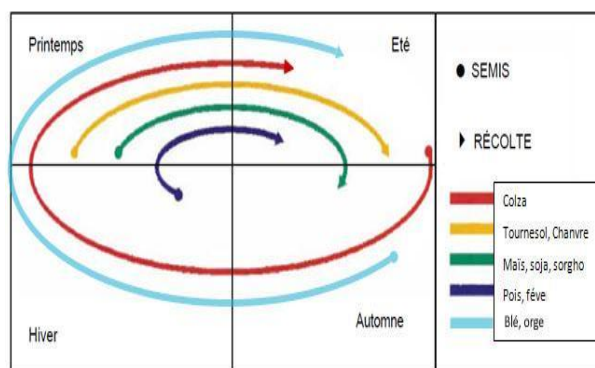


Figure 9 : Calendrier culturel des principales cultures de la région d'étude.

Les cultures se distinguent par ailleurs, par les pratiques agricoles mises en œuvre, qui sont propres aux espèces et aux exploitants. L'espacement entre les rangs et la densité de grain semé varient ainsi à l'échelle du paysage. La distance minimale entre les rangs de semis est observée sur les cultures de blé. Elle est maximale sur les cultures de maïs et de tournesol.

L'irrigation est quasi-systématique durant la période de croissance du maïs et du soja, alors que seulement quelques rares parcelles de blé ou de tournesol sont irriguées. Ces rares irrigations peuvent intervenir en fonction des conditions climatiques lors de la phase de développement, ou au cours de la phase d'émergence (irrigations 'starter', Goulard et al., 2011). Les techniques d'irrigation diffèrent en fonction de taille des parcelles et des équipements présents. Au sein de la zone d'étude, l'eau est dispensée à l'aide de canons, de sprinklers, ou de pivots (Figure 10).



Figure 10 : Illustrations des techniques d'irrigation rencontrées dans la zone d'étude : canon a), sprinklers b), pivot c).

Pendant les périodes d'inter cultures (après la récolte, et avant le semis suivant), les parcelles (argilo-limoneux/argilo-calcaire selon l'emplacement dans le super-site) présentent des états de surface très contrastés (Figure 11). Ils dépendent du travail du sol par les exploitants (labour, déchaumage, disquage, ...), qui visent par

exemple à l'enfouissement des résidus de culture, à la destruction d'adventices, ou à la décompaction de l'horizon superficiel.



Figure 11 : Exemples de conditions de surface observés après un travail du sol : labour a), disquage b), et semis c).

Suivant les exploitants et les recommandations en vigueur, différentes rotations de cultures sont observées. Toutefois, certaines parcelles ne présentent pas de rotation, par exemple lorsqu'elles sont équipées de matériels utiles pour l'irrigation, et sont réservées à la culture du maïs. Enfin, des cultures dites intermédiaires ou *CIPAN* (Culture Intermédiaire Piège A Nitrates) peuvent être intercalées entre deux cultures saisonnières, afin de fixer l'azote atmosphérique.

Dans ce contexte, le dispositif expérimental mis en œuvre lors de la campagne *MCM'10* vise à maximiser les possibilités de suivi des paramètres de surface. Deux approches complémentaires sont combinées lors de chaque acquisition satellite réalisée dans le domaine des micro-ondes : un suivi qualitatif sur 350 parcelles, et un suivi quantitatif sur 37 parcelles (Figure 12 et Tableau 1).

		Suivi qualitatif	Suivi quantitatif
Nombre de parcelles		350	37
Sol			
	Humidité	-	x
	Rugosité	x	x
	Texture	-	x
Vegetation			
	Occupation du sol	x	x
	Phénologie	x	x
	Pratiques Culturelles	x	x
	Hauteur	x	x
	Biomasse	-	x

Tableau 1 : Nombre de parcelles et paramètres collectés lors de la campagne de mesure. Concernant le suivi de la biomasse, une parcelle par culture est échantillonnée (voir section 0).

La sélection des parcelles d'intérêt est basée sur différents critères. Elles doivent présenter des conditions contrastées d'un point de vue du sol (texture, profondeur, présence ou absence de drain...), et des pratiques culturales (différentes espèces cultivées, avec et sans irrigation...), afin de rendre compte de la zone étudiée. D'autre part, la collecte doit être effectuée sur une « courte » durée (une journée), afin d'être réalisée au plus près des acquisitions satellites.

Ce dispositif délimite une zone proche de 420 Km² (22 Km × 19 Km), sur laquelle sont focalisées les acquisitions satellites radar et optiques (sections 3.1.6 et 3.2.1). Les informations collectées sur les 350 parcelles concernent les états de surface (section 4.4). Sur les 37 parcelles, des mesures quantitatives d'humidité de surface (section 4.1), de rugosité (section 4.2), de texture (section 4.3), et de végétation (section 4.4) sont réalisées. Parmi ces 37 parcelles, huit sont sélectionnées pour l'étalonnage des sondes utilisées pour la collecte de l'humidité de surface (section 4.1.1), et six pour la stratification verticale de la biomasse (section 0).

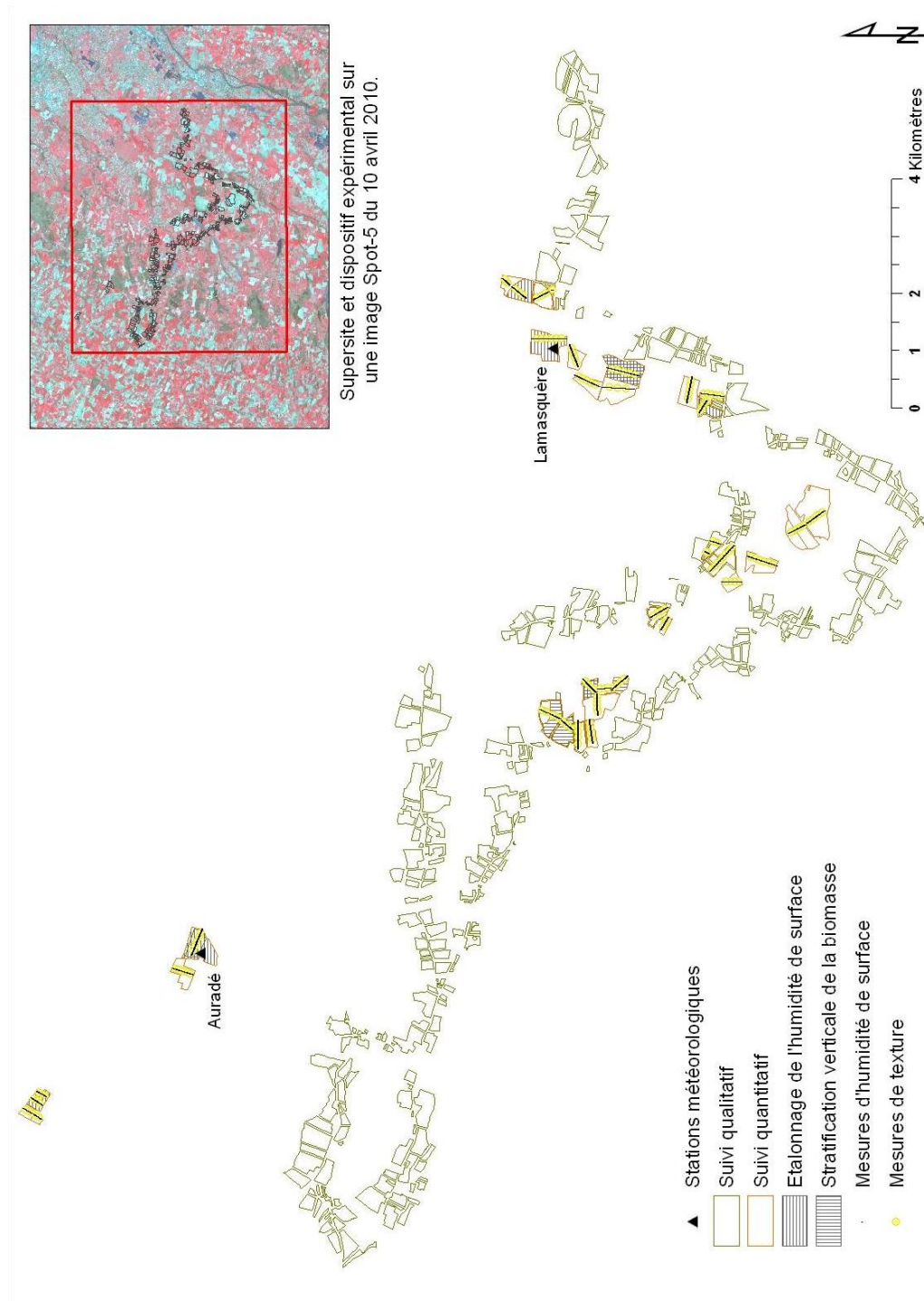


Figure 12 : Dispositif expérimental mis en œuvre lors de la campagne MCM'10.

3. LES ACQUISITIONS SATELLITES MULTI-CAPTEURS

Au cours de la campagne expérimentale, deux familles d'instrument ont servi à l'acquisition des images satellites : les capteurs passifs et actifs. Les radiomètres, qualifiés de **passifs**, enregistrent un rayonnement d'origine naturelle, réfléchi ou émis par la surface de la Terre. Par opposition, les RADAR (Radio Detection And Ranging) sont qualifiés de capteurs **actifs**, l'antenne du satellite émet son propre rayonnement, indépendant de toute autre source d'énergie. Ils fonctionnent dans le domaine des hyperfréquences, leur offrant la possibilité d'effectuer des acquisitions de jour comme de nuit.

Les capteurs satellites enregistrent un rayonnement électromagnétique caractérisé par sa fréquence (f), ou sa longueur d'onde spatiale (λ), (grandeurs liées par la relation $\lambda = c_0/f$, où c_0 correspond à la vitesse de la lumière dans le vide, soit 3.10^8 m.s^{-1}). Ces fréquences sont regroupées en domaines (et sous-domaines), et constituent le spectre électromagnétique (Figure 13). Les données satellites décrites dans les paragraphes suivants appartiennent à trois grands domaines : le visible ($380 < \lambda < 780 \text{ nm}$), l'infrarouge ($\lambda = 0,78\text{-}100 \mu\text{m}$) et les micro-ondes ($\lambda = 0,1\text{mm-}100 \text{ cm}$).

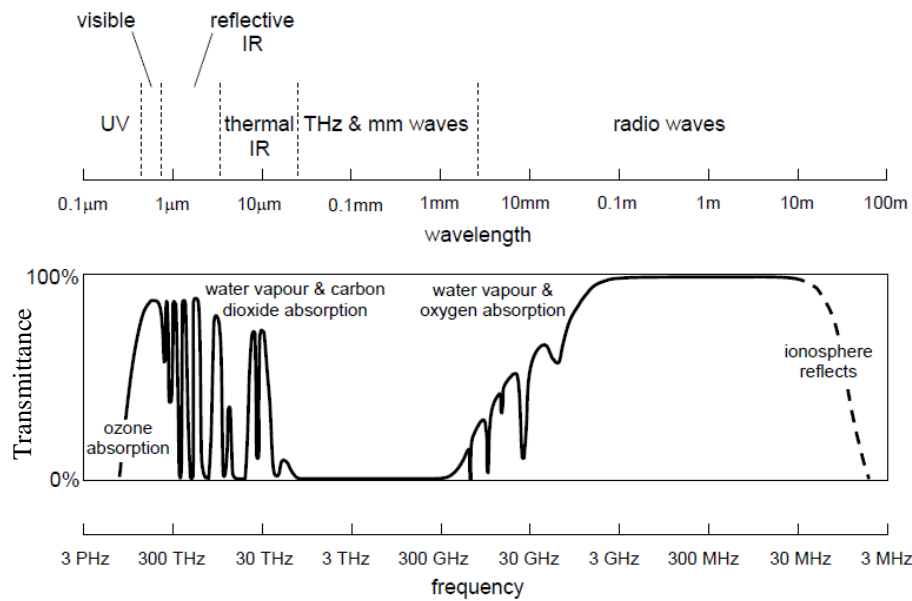


Figure 13 : Spectre électromagnétique et transmittance de l'atmosphère depuis l'espace.(Richards, 2008)

L'effet de l'atmosphère sur le rayonnement électromagnétique dépend de la longueur d'onde considérée (Figure 13). Les capteurs opérant dans le visible et le proche infra-rouge vont ainsi être fortement impactés par la présence de nuages, formant une barrière au rayonnement. La présence de particules dans l'atmosphère perturbe également le rayonnement à travers deux types d'interactions ; diffusion de Rayleigh (dans le cas de petites particules, de taille inférieure au dixième de la longueur d'onde considérée) ou diffusion de Mie (pour les particules de plus grande taille). Les hyperfréquences présentent une sensibilité moindre à l'atmosphère, les particules en suspension étant de petite taille en comparaison des longueurs d'onde considérées. Les capteurs opérant dans les micro-ondes constituent, par conséquent, des outils privilégiés pour le suivi de zones où la couverture nuageuse est fréquente ou importante.

Les précipitations peuvent constituer un problème à la propagation des micro-ondes. Toutefois, l'atténuation du signal n'est significative que pour des conditions particulières : faible longueur d'onde du capteur couplée à d'importantes précipitations (Figure 14).

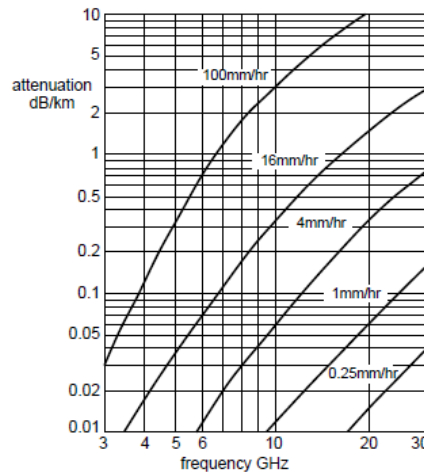


Figure 14 : Effet des précipitations sur la propagation des micro-ondes. (Richards, 2008)

Les capteurs utilisés lors de la campagne expérimentale, sont embarqués sur des satellites mis en **orbite** quasi-polaire. Chacun des satellites possède son propre cycle orbital (soit 11, 24 et 46 jours pour TerraSAR-X, Radarsat-2 et Alos), avec des taux de revisite très contrastés (en conditions nominales). Cependant, la **période de revisite réelle**, ou temps mis par le satellite pour observer le même point, peut être inférieure au cycle orbital grâce au système de dépointage des antennes SAR (angle d'incidence variable). Le recouvrement entre fauchées, ainsi que l'acquisition lors des différentes orbites (ascendante ou descendante) augmentent également les possibilités de couverture d'un même site.

3.1. Les images radar

3.1.1. Généralités

Le fonctionnement des Radar à Synthèse d'Ouverture (*RSO* ou *SAR*) est basé sur l'alternance entre : émission d'impulsions micro-ondes illuminant une cible, et enregistrement de signaux rétrodiffusés par la surface (Figure 15). Les impulsions sont émises à intervalles réguliers (dépendant de la fréquence de répétition des impulsions, f_r), durant une durée (τ), et à une fréquence (f) spécifiques. La visée de l'instrument étant latérale à l'orbite, le déplacement du satellite permet l'obtention d'images, par enregistrement et traitement du signal rétrodiffusé, selon une fréquence d'échantillonnage notée : f_e . Ces capteurs sont ainsi qualifiés de radar imageurs.

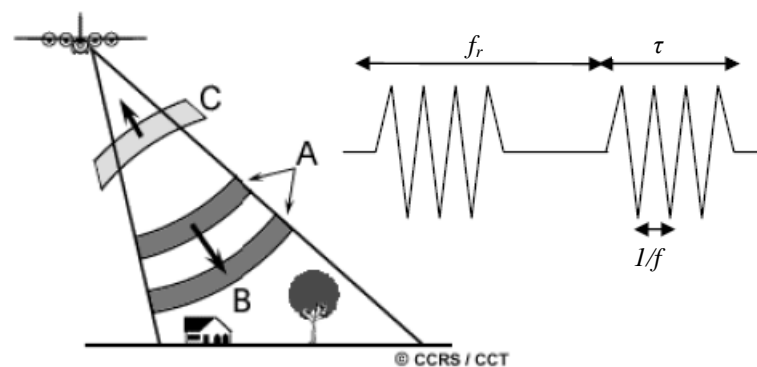


Figure 15 : Principe de fonctionnement des capteurs SAR.

L'antenne émet et reçoit des ondes électromagnétiques appartenant à un sous-domaine des micro-ondes (Figure 16). Les satellites, décrits dans les paragraphes suivants, acquièrent des images à des fréquences de 9.65, 5.40 et 1.27 GHz, correspondant respectivement aux bandes X, C et L.

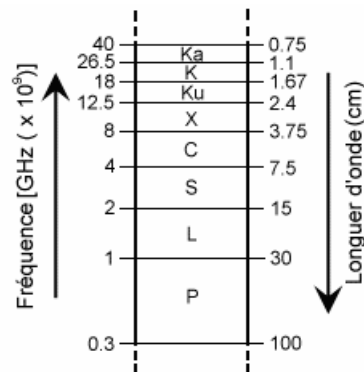


Figure 16 : Bandes de fréquence en télédétection radar.

Une Onde ElectroMagnétique (*OEM*) est caractérisée par deux champs, électrique et magnétique, orthogonaux. Elle se déplace à la vitesse de la lumière dans le vide ou dans l'air. Outre la fréquence, l'onde est caractérisée par son état de polarisation. Il correspond à l'orientation du champ électrique par rapport au plan de propagation de l'onde. Dans le cas des polarisations linéaires (seules utilisées en télédétection satellitaire), les états de polarisation sont horizontaux (abréviés *H*) ou verticaux (*V*). Les données radar sont associées à un couple de lettre. La première renseigne l'état de polarisation de l'onde émise, la seconde concerne celui de

l'onde reçue. Les quatre configurations possibles sont appelées : co-polarisation si les états de polarisation sont similaires à l'émission et à la réception du signal (*HH* et *VV*), ou cross-polarisation ou polarisation croisée dans le cas contraire (*HV* et *VH*). Enfin, l'onde émise est également caractérisée par un angle d'incidence (θ). Il correspond à l'angle formé entre la direction de propagation de l'onde (k) et la verticale du satellite.

3.1.2. Les résolutions spatiales

La résolution spatiale d'un instrument radar est fonction de la direction considérée. La trajectoire du satellite projetée au sol sert à distinguer : un axe perpendiculaire au déplacement, appelé **axe radial**, et un axe parallèle, qualifié d'**axe azimutal** (Figure 17). Les résolutions dans ces deux dimensions sont respectivement notées : r_r et r_a . Ces grandeurs dépendent des caractéristiques des capteurs qui conditionnent également la taille des pixels notées : X_r et X_a .

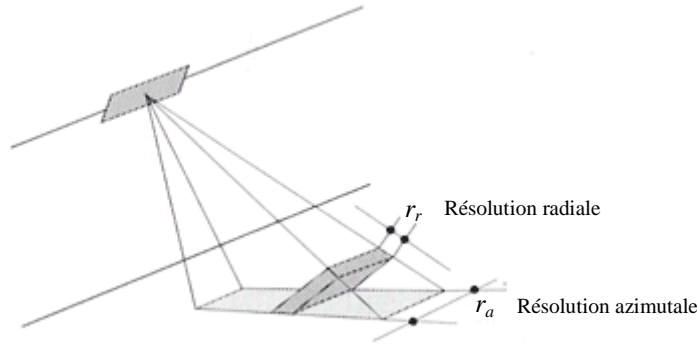


Figure 17 : Axes et résolutions radiales et azimutales d'un instrument radar (Maitre, 2001).

Résolution radiale

La résolution minimale, perçue par le capteur dans la direction d'émission de l'onde, a pour expression :

$$r_r = \frac{c_0 \tau}{2} \quad \text{Équation 1}$$

et dépend de la durée de l'impulsion émise (τ) et de la vitesse de propagation (considérée constante et équivalente à la vitesse de la lumière dans le vide (c_0)).

La projection au sol de cette résolution tient compte de l'angle d'incidence (θ). Pour une surface horizontale, la distance au sol est :

$$r_{r-sol} = \frac{c_0 \tau}{2 \sin(\theta)} \quad \text{Équation 2}$$

La résolution radiale dépend donc des caractéristiques de l'onde émise par l'antenne. Sa valeur est d'autant plus faible que la durée d'impulsion est courte, et que l'angle d'incidence est important.

La réduction de la durée de l'impulsion étant techniquement limitée, le gain en résolution radiale est rendu possible grâce à la compression de l'impulsion de l'OEM (appelé également chirp). Le signal est alors modulé en fréquence, et nécessite un filtrage adapté. La résolution est ainsi améliorée d'un facteur ($K \tau$), et devient :

$$r_{r-sol} = \frac{c_0}{2 \sin(\theta)} \frac{1}{K \tau} \quad \text{Équation 3}$$

Durant les phases de réception, le signal rétrodiffusé est enregistré à une fréquence d'échantillonnage spécifique (f_e), découpant le signal en échantillons appelés portes. La taille de ces portes est :

$$X_{r-sol} = \frac{c_0}{2 f_e \sin(\theta)} \quad \text{Équation 4}$$

Elle correspond à la taille des pixels dans la direction radiale. La fréquence d'échantillonnage est fixée en respectant la condition suivante : $X_{r-sol} < r_{r-sol}$, évitant ainsi les pertes d'information spatiale qui pourrait se produire lors d'un sous-échantillonnage (f_e trop faible).

Résolution azimuthale

En reconstituant artificiellement une antenne de grande dimension, la technologie *RSO* résout le problème relatif à la taille de l'antenne en améliorant la résolution le long de la trajectoire du satellite (résolution azimuthale).

La formulation de la résolution azimuthale des radars à ouverture réelle (*ROR* ou *RAR*) pour expression :

$$r_a = \beta_a D \quad \text{où } \beta_a = \frac{\lambda}{l} \quad \text{et } D = \frac{H}{\cos(\theta)} \quad \text{Équation 5}$$

Dans ce cas, la longueur d'onde du signal (λ) et la longueur de l'antenne (l) servent à l'estimation de l'ouverture azimuthale (β_a). La distance entre la cible et le capteur (D) est déduite de l'altitude du satellite (H) et de l'angle d'incidence (θ).

Avec une altitude de 514 km et une longueur d'onde de 3.1 cm, TerraSAR-X offre les meilleures conditions afin de minimiser la résolution azimuthale (comparé aux deux autres couples satellite/capteur utilisés dans ces travaux de thèse). Cependant pour obtenir une résolution de 10 m, avec un angle d'incidence de 20°, la dimension de l'antenne atteindrait 1696 m, avec la technologie *RAR*.

La technologie *RSO* s'appuie sur le traitement numérique des échos renvoyés par une même cible, et successivement reçus lors du déplacement du satellite (Figure 18). Le premier et le dernier écho renvoyés par la cible délimitent les extrémités de l'antenne synthétique. La longueur de cette antenne a pour expression :

$$L = \beta_a D \quad \text{Équation 6}$$

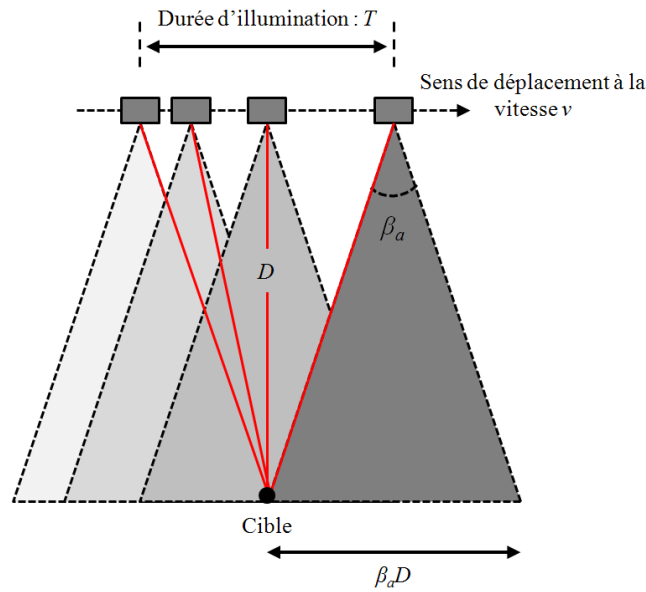


Figure 18 : Antenne synthétique des capteurs SAR.

Le traitement numérique consiste à corriger le décalage de fréquence (ou effet Doppler), conséquence de la variation de la distance cible-antenne lors du déplacement du satellite, entre l'émission et la réception du signal. Dans le cas des instruments SAR, la méthode s'appuie sur l'estimation du déphasage entre impulsions successives, soit :

$$\varphi(t) = 2\pi \frac{2D(t)}{\lambda} \quad \text{Équation 7}$$

Ce déphasage dépend de la distance cible-antenne qui varie au cours du temps, et a pour expression :

$$D(t) = \sqrt{D_0^2 + (vt)^2} \quad \text{Équation 8}$$

Cette distance est approximée, et devient :

$$D(t) = D_0 + \frac{(vt)^2}{2D_0} \quad \text{car } vt \ll D_0 \quad \text{Équation 9}$$

L'expression de la fréquence Doppler découle des Equations 7 et 9, soit :

$$f_{\text{dop}} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = 2 \frac{v^2 t}{\lambda D_0} \quad \text{Équation 10}$$

Durant l'intervalle de temps (T) où la cible est visible, la bande Doppler utilisable est :

$$B^{\text{dop}} = 2 \frac{v^2 T}{\lambda D_0} \quad \text{avec } T = \frac{\beta_a D_0}{v} \quad \text{Équation 11}$$

Elle détermine la résolution azimutale, qui a pour expression :

$$r_a = \frac{v}{B^{\text{dop}}} \equiv \frac{l}{2} \quad \text{Équation 12}$$

Au final, la résolution azimutale dépend seulement de la taille de l'antenne, et sa valeur est d'autant plus faible que l'antenne est de petite longueur (l).

La taille des portes, ou pixels, dans la direction azimutale correspond au rapport entre la vitesse relative du satellite au sol (v), et la fréquence de répétition des impulsions (f_{ri}), soit :

$$X_{a-\text{sol}} = \frac{v}{f_{ri}} \quad \text{Équation 13}$$

Le sur-échantillonnage évite la perte d'information spatiale, le choix de la fréquence répond à la condition suivante : $X_{a-\text{sol}} < r_{a-\text{sol}}$ comme dans le cas de la résolution radiale.

3.1.3. Les déformations géométriques des images SAR

Le relief, d'origine naturelle ou anthropique (bâtiments, ouvrages d'art...), engendre différentes distorsions géométriques. Ainsi, lorsqu'une *OEM* est réfléchi par le sommet d'un objet, elle est reçue avant celle renvoyée par la base de ce même objet. Sur l'image produite, l'objet apparaît comme replié dans la direction du capteur. Ce phénomène, appelé '**Layover**', s'explique par la différence de distance entre cibles et satellite (le sommet étant plus proche du capteur que la base). Lorsque le relief est très marqué ou l'angle d'incidence élevé, des effets d'ombres peuvent apparaître sur les images SAR (**Shadowing**). Il en résulte une partie noire sur l'image, où aucune information utile de la surface ne peut être extraite. Dans ces zones de relief, les angles locaux vont engendrer des déformations. La « face avant » (dans la direction du capteur) est contractée sur l'image, alors que la « face arrière » est dilatée.

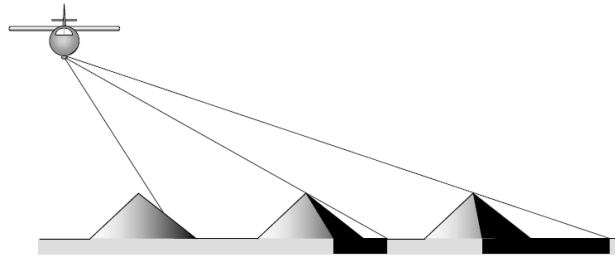


Figure 19 : Déformation géométrique des images.

La zone d'étude suivie dans le cadre de la campagne *MCM'10* est très peu affectée par les déformations géométriques, en raison d'un très faible relief.

3.1.4. Le Chatoiement

L'*OEM* reçue par l'antenne *SAR* correspond à la somme cohérente des ondes réfléchies par l'ensemble des réflecteurs 'distribués de manière aléatoire' dans le paysage. L'amplitude et la phase de chacune des ondes réfléchies vont s'additionner (interférences constructives) et/ou se soustraire (interférences destructives) engendrant de fortes variations du signal enregistré. Une cible homogène formée de nombreux pixels apparaît ainsi avec un aspect « poivre et sel ». Ce phénomène est appelé Chatoiement ou Speckle.

L'image présentée ci-dessous (Figure 20a), extraite des images *SAR* utilisées par la suite, illustre ce phénomène sur des parcelles agricoles. L'application d'un filtre numérique atténue ce phénomène, et améliore l'aspect de l'image (Figure 20b). Différents algorithmes, basés sur des approches spatiales ou temporelles, ont été développées afin de réduire le chatoiement. Ils sont utilisés pour la détection de formes particulières, de contours, ou d'objets.

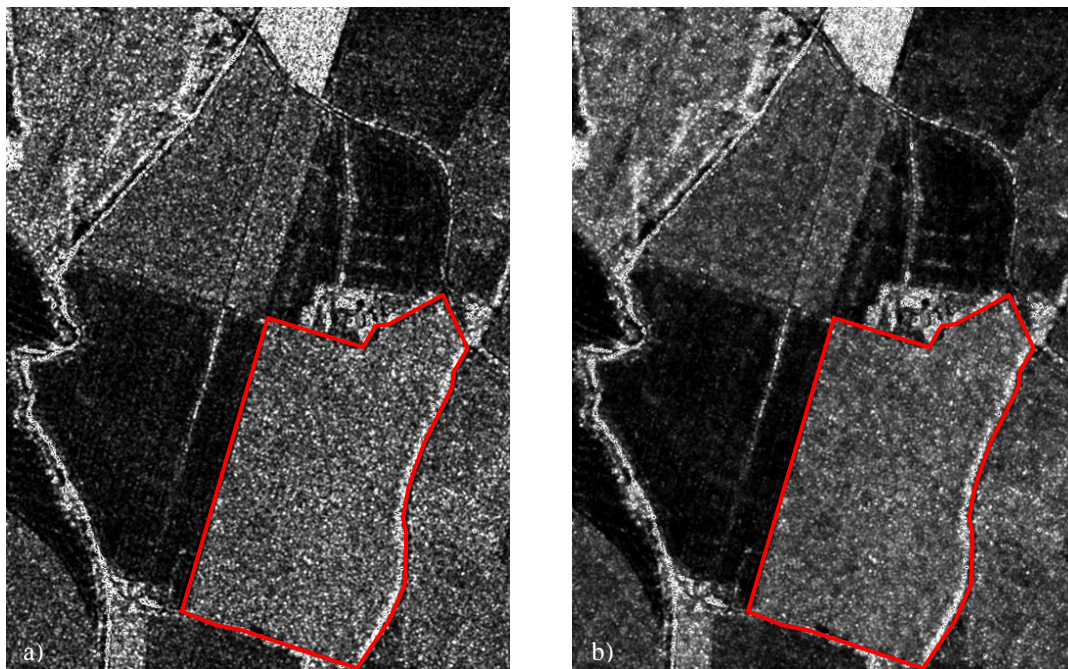


Figure 20 : Image TerraSAR-X originelle a), et après application d'un filtre de Lee (fenêtre spatiale de 10×10 pixels) b).

Le filtre de Lee (largement utilisé en traitement d'image radar), réduit la dispersion au sein d'une même entité, comme en attestent les histogrammes présentés sur la Figure 21. La valeur moyenne des pixels de la parcelle n'est pas modifiée par le filtre (-8,66 contre -8,67 dB) alors que la dispersion est fortement réduite (les écarts types passent de 2,24 à 1,46 dB)

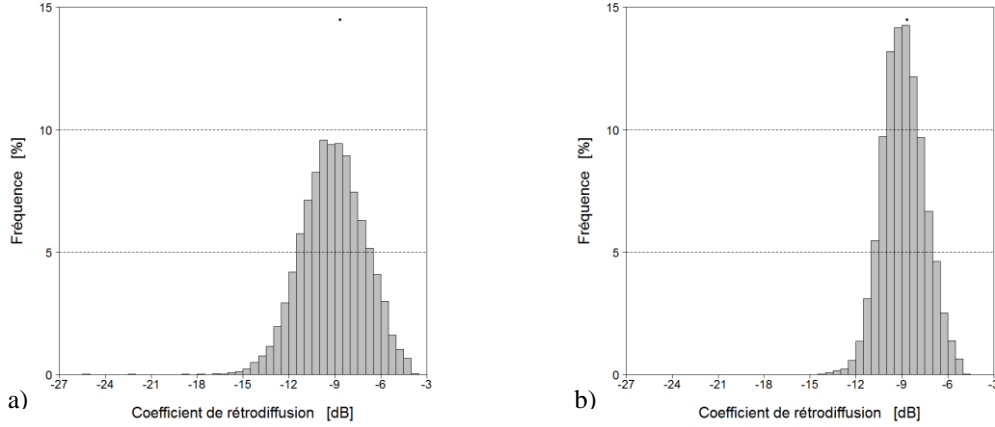


Figure 21 : Histogrammes des coefficients de rétrodiffusion d'une parcelle avant a) et après application du filtre de Lee (fenêtre spatiale de 10×10 pixels) b). La valeur moyenne des pixels est indiquée par le point noir (~8.67dB).

3.1.5. L'équation du radar

En télédétection radar, les caractéristiques de l'antenne et l'information véhiculée par l'OEM servent au calcul du coefficient de rétrodiffusion. Cette grandeur est dérivée de l'Equation 14, et est communément exprimée en décibel (Equation 15). Les valeurs du coefficient de rétrodiffusion sont fonction du rapport entre les puissances émise et reçue, en fonction de la surface effective de la cible. La distance entre la cible et l'antenne, la longueur d'onde du signal ainsi que les pertes et gains de propagation complètent l'expression.

$$\sigma^{\circ}_{[naturel]} = \frac{(4\pi)^3 D^4}{\lambda} \frac{L_e L_r}{G_e G_r} \frac{P_r}{P_e} \frac{1}{S_{eff}} \quad \text{Équation 14}$$

$$\sigma^{\circ}_{[dB]} = 10 \log_{10}(\sigma^{\circ}_{[naturel]}) \quad \text{Équation 15}$$

avec :

- D : Distance entre la cible et l'antenne,
- λ : Longueur d'onde du signal,
- L_e et L_r : Facteurs de perte de l'antenne, à l'émission et à la réception,
- G_e et G_r : Gains de l'antenne, à l'émission et à la réception,
- P_e et P_r : Puissances émise et reçue,
- S_{eff} : Surface effective vue par l'antenne.

3.1.6. Propriétés et traitements des données SAR utilisées

Les données satellites radar ont été acquises dans le cadre de projets déposés auprès des agences spatiales allemande, canadienne, européenne et japonaise : SOAR, ID 6843 et HYD0611, PI : Frédéric Baup. L'accès aux données passe par la réalisation de plan d'acquisition, la zone d'étude n'étant pas couverte de manière systématique par ces capteurs.

Traitement des données SAR

Dans ces travaux de thèses, l'objectif est d'étudier la sensibilité des signaux satellites, à l'échelle de la parcelle. La forme de ces entités sert à l'extraction des données. Les statistiques (minimum, maximum, moyenne, médiane, et écart type) sont déduites de l'ensemble des pixels de chaque parcelle.

L'extraction des coefficients de rétrodiffusion suit les étapes de calibration radiométrique, et de géo-référencement des images. La calibration radiométrique des produits TerraSAR-X est basée sur la procédure décrite par Fritz et al., 2008 en utilisant l'Equation 16. Les images Radarsat-2 et Alos sont calibrées en utilisant le logiciel NEST, qui suit les Equations 17 et 18 (MDA, 2000; Lavalle and Wright, 2009).

$$\sigma_i^0 \text{ (dB)} = 20 \times \log_{10}(DN_i) + 10 \times \log_{10}(K) + 10 \times \log_{10}(\sin(\theta_i)) \quad \text{Equation 16}$$

$$\sigma_i^0 \text{ (dB)} = 20 \times \log_{10}(DN_i/A2_i) + 10 \times \log_{10}(\sin(\theta_i)) \quad \text{Equation 17}$$

$$\sigma_i^0 \text{ (dB)} = 20 \times \log_{10}(DN_i) + K \quad \text{Equation 18}$$

Dans le cas des produits délivrés par TerraSAR-X et Alos, la valeur du coefficient de rétrodiffusion (σ^0) au pixel i , est fonction du compte numérique (DN), de la constante de calibration (K) et de l'angle d'incidence (θ). Concernant les produits Radarsat-2, un gain ($A2$) est également pris en compte.

Les images sont géo-référencées sur la base d'ortho-photos délivrées par l'Institut Géographique National (IGN). La résolution des ortho-photos (50 cm) est dégradée pour correspondre à la résolution des différents produits satellites. Par la suite, l'image IGN sert de référence pour la localisation de 70 points de référence pour chacune des images SAR. La précision de géo-localisation est de 10 m en moyenne en considérant la taille des pixels des différents produits. A la vue de cette précision, les contours vectoriels des parcelles ont été rognés afin d'éviter les effets de mixels (mélange entre des valeurs radiométriques issues de la parcelle d'intérêt et de la parcelle voisine).

Propriétés d'acquisition des données SAR

Quel que soit le capteur satellitaire, les images sont acquises selon deux modes de fonctionnement :

- **Mode Stripmap** : il est présent sur les satellites opérant dans les micro-ondes depuis le satellite ERS-1. Il sert à l'acquisition des images TerraSAR-X, Radarsat-2 et Alos. Le faisceau d'antenne illumine une bande du sol, par une séquence d'impulsions. Le déplacement du satellite sur son orbite permet la formation des images (Figure 22a).

- **Mode Spotlight** : il est utilisé pour l'acquisition d'une série d'images TerraSAR-X, à haute résolution spatiale. Le temps d'illumination d'une zone fixe est prolongé, par visée stéréographique dans la direction azimutale. Les images sont caractérisées par une meilleure résolution spatiale au détriment de leur emprise (Figure 22b).

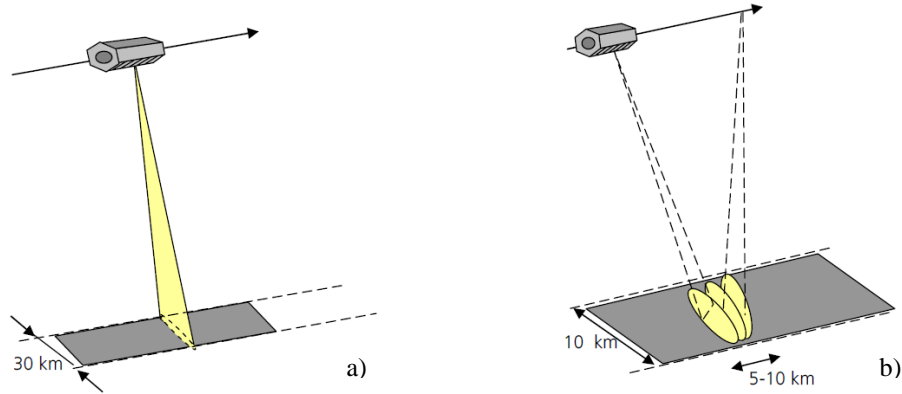


Figure 22 : Représentation des modes de fonctionnement Stripmap a) et Spotlight b).

Images TerraSAR-X

Le satellite allemand TerraSAR-X, lancé en Juin 2007, est dédié à l'observation de la Terre (Breit et al., 2010). Son cycle orbital est de 11 jours. Le capteur *RSO* embarqué fonctionne en bande X, à une fréquence de 9.65 GHz ($\lambda=3.1$ cm). L'instrument est programmable selon quatre modes d'acquisition exclusifs : Stripmap (*SM*), High Resolution Spotlight, Spotlight (*SL*), et ScanSAR.

Au cours de l'année 2010, 40 acquisitions ont été effectuées en co-polarisation, à l'aide des modes *SM* et *SL*, soit une image tous les 7 jours en moyenne (Figure 23). Les principales caractéristiques des séries d'image sont décrites ci-dessous.

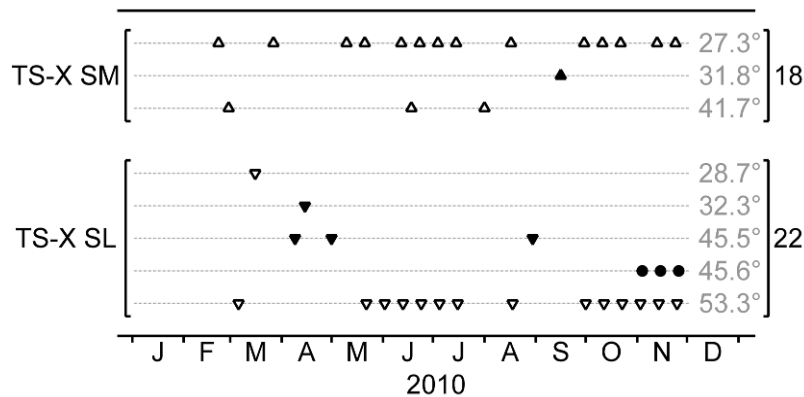


Figure 23 : Chronogramme des acquisitions effectuées par TerraSAR-X (TS-X), avec les modes Stripmap (*SM*) et Spotlight (*SL*). Les valeurs numériques en gris correspondent aux angles d'incidence. Les orbites descendantes sont indiquées par les figurés blancs, les ascendantes en noir. Les polarisations HH et VV sont respectivement représentées par des triangles et des ronds.

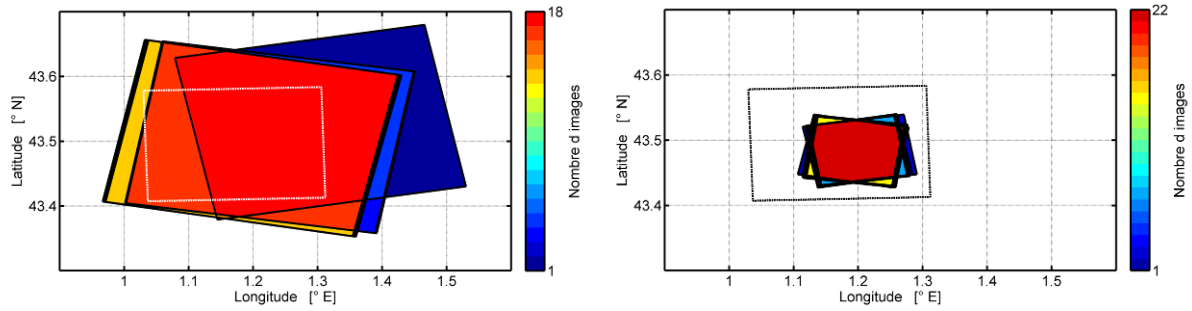


Figure 24 : Surfaces communes partagées par les images TerraSAR-X (en modes Stripmap, a), et Spotlight, b)) focalisées sur le super site.

Mode Stripmap (SM)

Ce mode de fonctionnement autorise l'acquisition d'images à des angles compris entre 20 et 45°. Les images délivrées avec un seul état de polarisation sont caractérisées par une couverture spatiale maximale de 30×50 km² (distances azimutale et radiale). La résolution azimutale est de 3.3 m, alors que la résolution radiale varie entre 1.70 m à 45° et 3.49 m à 20°.

Entre les mois de février et de novembre, 18 images ont été régulièrement acquises en mode StripMap (Figure 23). Le temps entre deux acquisitions est compris entre 5 et 44 jours. Les images ont été majoritairement acquises à 27.3° (~80%). Seules 4 images ont été acquises avec des angles d'incidence de 31.8° et 41.7°. Toutes les images sont délivrées avec le même état de polarisation (*HH*) en orbite descendante (excepté une acquisition effectuée en orbite ascendante). Une zone de superficie proche de 600 km² est couverte par l'intégralité des images (Figure 24). Le super-site (représenté par un rectangle blanc sur la Figure 24) est couvert à 70% par cette zone commune. Cette couverture avoisine les 100%, en exceptant la scène acquise en orbite ascendante.

Mode Spotlight (SL)

Ce mode de fonctionnement permet l'acquisition d'images à des angles compris entre 20 et 55°. Les scènes couvrent des distances azimutale et radiale identiques de 10 km. Les images acquises avec un seul état de polarisation ont une résolution azimutale de 1.7 m. La résolution radiale varie entre 1.48 m à 55°, et 3.49 m à 20°.

Entre les mois de mars et de novembre, 22 images ont été régulièrement acquises avec ce mode de fonctionnement (Figure 23). L'intervalle temporel entre deux acquisitions varie de 1 à 33 jours. La série a été acquise à des angles d'incidences compris entre 28,7° et 53,3° (14 images étant délivrées à cet angle d'incidence). Les images sont acquises avec un même état de co-polarisation (*HH*), excepté trois images acquises avec la co-polarisation verticale (représentées par des figurés ronds sur la Figure 23). Les orbites sont majoritairement descendantes (15 contre 7 ascendantes). Les images sont centrées sur la coordonnée : 43°29'36''N, 01°14'14''E, et délimitent une surface commune proche de 100 km², correspondant à 23% du super site (Figure 24).

Images Radarsat-2

Le satellite canadien Radarsat-2, lancé en Décembre 2007 (Morena et al., 2004), transporte un radar *RSO* opérant en bande C, à une fréquence de 5.405 GHz ($\lambda=5.5$ cm). Le cycle orbital est de 24 jours. L'instrument embarqué est programmable selon 17 modes d'acquisition.

En 2010, 26 acquisitions ont été effectuées à l'aide du mode Fine Quad-polarization, soit une image tous les 11 jours en moyenne (Figure 25). Les principales caractéristiques de ces produits sont présentées ci-dessous.

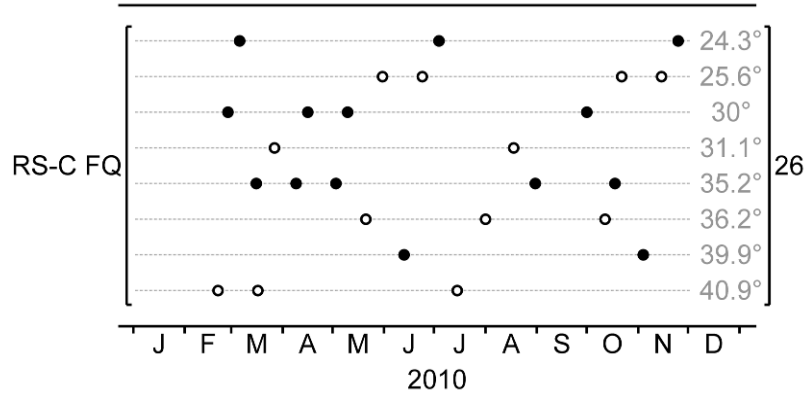


Figure 25 : Chronogramme des acquisitions RADARSAT-2 (RS-C) effectuées en mode Fine Quad-polarization. Les valeurs numériques en gris correspondent aux angles d'incidence. Les orbites descendantes et ascendantes sont respectivement indiquées par les figurés blancs et noirs.

Mode Fine Quad-polarization (FQ)

Ce mode de fonctionnement autorise l'acquisition d'images à des angles compris entre 20 et 41°. Les images sont caractérisées par une couverture spatiale identique dans les deux dimensions de 25×25 km². La résolution azimutale est de 4.73 m, alors que la résolution en distance varie entre 4.97 et 5.11 m. Les images acquises avec ce mode sont délivrées avec quatre états de polarisation simultanés (*HH*, *VV*, *HV* et *VH*).

Les images acquises entre les mois de février et de novembre sont séparées de 1 à 31 jours au maximum. Les acquisitions sont effectuées à angles d'incidences compris entre 24.3° et 40.9° (correspondant aux configurations *FQ* 5, 6, 10, 11, 15, 16, 20 et 21). Les images ont été acquises en orbites ascendantes (14) et descendantes (12), couvrant une superficie de 442 km² (Figure 26). Seules les extrémités du super-site ne sont pas couvertes par cette zone commune, 83% de la zone d'étude étant visibles sur l'ensemble des images.

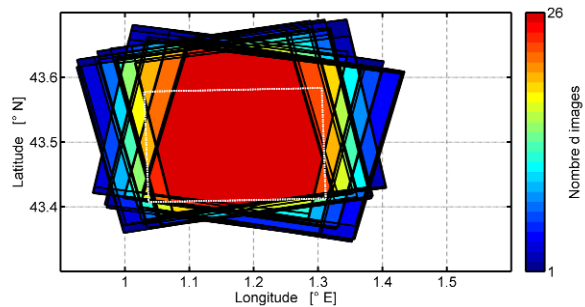


Figure 26 : Surfaces communes partagées par les images Radarsat-2 (mode Fine Quad-polarization), focalisées sur le super site (pointillés blancs).

Images ALOS

Le satellite japonais ALOS, lancé en Janvier 2006 (Rosenqvist et al., 2007), transportait deux capteurs optiques et un instrument qui opérait en bande L, à une fréquence de 1.27 GHz ($\lambda=23.6$ cm). Le capteur PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) fonctionnait selon cinq modes présélectionnés et mutuellement exclusifs : Fine Beam Single (*FBS*) et Dual (*FBD*), Polarimetric, ScanSAR et Direct Transmission. La période de revisite était égale au cycle orbital, soit 46 jours (aucun dépointage n'a été possible en pratique, contrairement aux spécifications théoriques du satellite).

En 2010, les modes *FBS* et *FBD* ont été utilisés afin de constituer une série de 7 images (Figure 27). Les principales caractéristiques de ces produits sont décrites ci-dessous. Une série de 26 images a également été acquise entre mars et novembre, en mode ScanSAR. Ces données, caractérisées par une résolution de 100 m, ne sont pas utilisées dans le cadre de cette thèse.

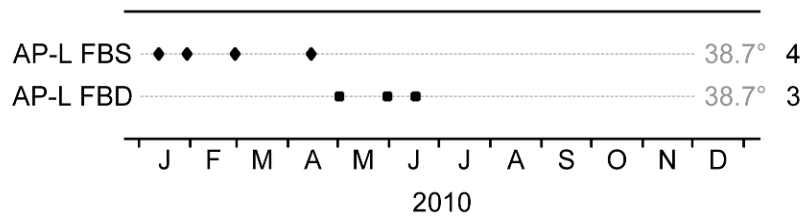


Figure 27 : Chronogramme des acquisitions ALOS (AP-L) effectuées en modes Fine Beam Single (*FBS*) et Dual (*FBD*) à 38.7° d'incidence

Modes Fine Beam Single (*FBS*) et Dual (*FBD*)

Les images acquises avec ces deux modes de fonctionnement ont en commun l'emprise (70 km de fauchée), l'orbite (ascendante), ainsi que l'angle d'incidence (38.7°). Le mode *FBS* est caractérisé par son état de polarisation simple (*HH*). La résolution spatiale est identique dans les directions radiales et azimutales (10 m). Les acquisitions avec le mode *FBD* sont délivrées avec deux états de polarisation (*HH* et *HV*). La résolution est de 10 m dans la direction azimutale, et de 20 m radialement.

Les premières images ont été acquises sur la première moitié de l'année, entre les mois de janvier et de juin. L'intervalle temporel maximum entre deux acquisitions est de 46 jours. Il est réduit à 17 jours au minimum, grâce au recouvrement de fauchées voisines. Concernant la couverture spatiale, une zone d'une superficie proche de 1333 km² est couverte par l'intégralité des images (Figure 28). La partie située à l'Est du super-site est suivie par les 7 images, elle représente 62% de la surface de la zone d'étude. La partie ouest est seulement suivie par 3 images.

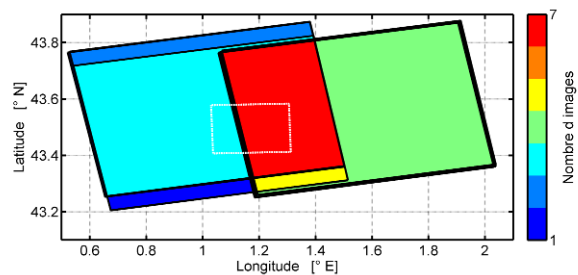


Figure 28 : Surfaces communes partagées par les images Alos (modes Fine Beam Single et Dual), focalisées sur le super site (pointillés blancs).

3.2. Les images optiques

3.2.1. Les images Spot-4/5 et Formosat-2

Les satellites européens Spot-4 et Spot-5 ont été respectivement lancés en mars 1998, et mai 2002 (Arnaud and Leroy, 1991). A leurs bords, des instruments optiques opèrent dans quatre bandes spectrales, dont les résolutions sont les suivantes : de 0,50 à 0,59 μm correspondant au vert, de 0,61 à 0,68 μm correspondant au rouge, de 0,78 à 0,89 μm correspondant au proche infrarouge, et 1,58 à 1,75 μm correspondant au moyen infrarouge. Les images sont acquises avec deux angles d'incidence, en utilisant le mode multi-spectral. La taille des pixels est de 20 et 10 m, pour Spot-4 et Spot-5.

Formosat-2 est un satellite taïwanais, lancé en mai 2004 (Chern et al., 2008). A son bord, un capteur optique fournit des images à des longueurs d'onde allant de 0.45 à 0.90 μm . Quatre bandes spectrales sont couvertes, avec les résolutions suivantes : le bleu de 0,45 à 0,52 μm , le vert de 0,52 à 0,60 μm , le rouge de 0,63 à 0,69 μm , et proche infrarouge de 0,76 à 0,90 μm . Toutes les images sont acquises avec le même angle d'incidence ($\pm 45^\circ$), en utilisant le mode multi-spectral, caractérisé par une résolution spatiale de 8 m.

En 2010, 8 images ont été acquises par chacun des satellites Spot et 14 par Formosat-2 (Figure 29). Les 30 scènes couvrent la période : janvier à décembre, avec une image tous les 11 jours en moyenne, aucune image n'est acquise durant le mois de novembre.

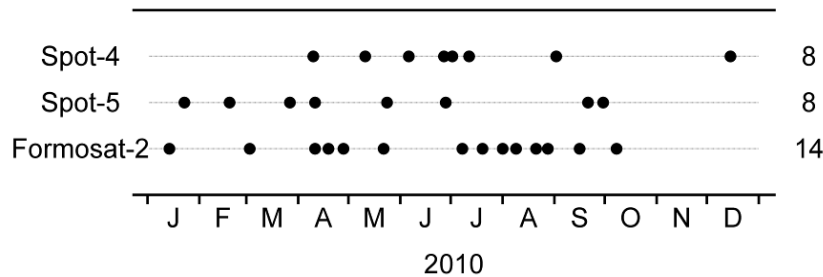


Figure 29 : Chronogramme des acquisitions Spot-4, Spot-5 et Formosat-2.

Concernant la couverture spatiale, une zone d'une superficie proche de 615 km^2 est couverte par l'intégralité des images Spot et Formosat (en rouge sur la Figure 30). Le super-site est totalement couvert par les images Spot, et à 82% par la zone commune aux images Formosat-2.

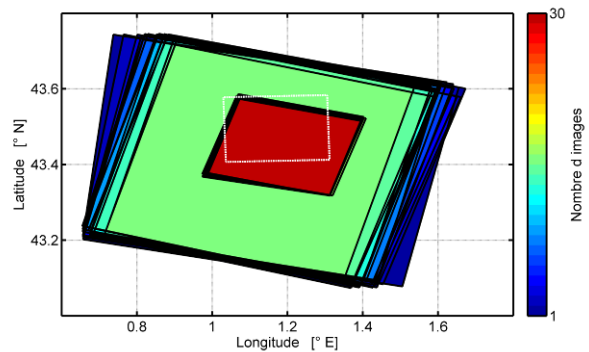


Figure 30 : Surfaces communes partagées par les images Spot-4/5 et Formosat-2, focalisées sur le super site (pointillés blancs).

3.2.2. Extraction des indices de végétation

Les images sont délivrées par Spot Image. Une correction géométrique est appliquée, permettant d'obtenir une précision de superposition inférieure à un demi pixel (Baillarin et al., 2008). Les données optiques sont traitées des effets atmosphériques à l'aide d'un algorithme multi-temporel. Les nuages et leurs ombres sur le sol sont détectés, les perturbations atmosphériques (liées aux effets des aérosols par exemple) sont corrigées. La méthode développée par Hagolle et al. in 2008, repose sur l'hypothèse suivante : réflectances de surface et propriétés optiques des aérosols varient différemment d'un point de vue spatial et temporel.

Les données de réflectance acquises par les différents capteurs sont utilisées afin de calculer deux indices de végétation : l'indice de végétation par différence normalisée (*NDVI*, Rouse et al., 1974; Tucker, 1979), et l'indice de végétation triangulaire modifié (*MTVI2*, Haboudane et al., 2004).

Le *NDVI* est calculé en utilisant les valeurs de réflectance acquises dans les bandes spectrales correspondant au rouge et au proche infrarouge (Equation 19). Cet indice s'appuie sur l'absorption des pigments chlorophylliens dans le visible, et sur la réflexion des structures de la feuille dans le proche infrarouge. Le *NDVI* est l'indice le plus communément utilisé pour le suivi de la végétation. Il sert d'indice de référence dans le Chapitre II, ainsi que dans l'étape de correction angulaire des coefficients de rétrodiffusion.

$$NDVI = \frac{\rho_{pir} - \rho_r}{\rho_{pir} + \rho_r} \quad \text{Equation 19}$$

Le *MTVI2* est dérivé des réflectances acquises dans le vert, le rouge et le proche infrarouge (Equation 20). Cet indice est développé par Haboudane et al., 2004, il a pour objectif de réduire les effets du sol en préservant la sensibilité à l'indice foliaire (*LAI*, Leaf Area Index). Le *MTVI2* est utilisée pour dériver le *LAI* en utilisant la relation empirique proposée par Liu et al. (2009).

$$MTVI2 = \frac{1,5[1,2(\rho_{pir} - \rho_v) - 2,5(\rho_r - \rho_v)]}{\sqrt{(2\rho_{pir} + 1)^2 - (6\rho_{pir} - 5\sqrt{\rho_r}) - 0,5}} \quad \text{Equation 20}$$

Les valeurs des indices, dérivés des satellites Spot-4, Spot-5 et Formosat-2, sont comparées en considérant les acquisitions avec un décalage temporel de deux jours au maximum. Le tableau ci-dessous présente différents critères statistiques, résultats des comparaisons des différents couples d'images disponibles (sur les parcelles servant au suivi qualitatif).

Concernant le *NDVI*, à l'échelle des 333 parcelles suivies, les différences observées entre les capteurs sont faibles, comme en attestent les valeurs des coefficients de détermination qui sont supérieures à 0,965 et celles des erreurs relatives inférieures à 17%. Les différences entre capteurs sont minimales dans le cas du couple d'image acquises le 10/04/2010. A l'inverse, la dispersion augmente lorsque les acquisitions ne sont pas réalisées le même jour (les changements des conditions de surface expliquant en partie cette dispersion).

Concernant le *MTVI2*, les différences entre capteurs sont plus importantes. Elles restent toutefois faibles, avec des valeurs des coefficients de détermination supérieures à 0,97. L'ajout d'une troisième bande augmente la dispersion, l'erreur relative varie entre ainsi 11 et 24%.

Satellite [Date] - Satellite [Date]	n	R ²	RMSE	rRMSE	Biais
NDVI					
Spot-4 [09/04/2010] - Spot-5 [10/04/2010]	333	0,993	0,037	6	0,032
Spot-4 [09/04/2010] - Formosat-2 [10/04/2010]	333	0,994	0,035	6	0,025
Spot-5 [10/04/2010] - Formosat-2 [10/04/2010]	333	0,996	0,019	3	-0,006
Formosat-2 [21/05/2010] - Spot-5 [23/05/2010]	333	0,985	0,063	10	-0,050
Spot-4 [26/06/2010] - Spot-5 [27/06/2010]	333	0,965	0,077	17	0,069
MTVI2					
Spot-4 [09/04/2010] - Spot-5 [10/04/2010]	333	0,984	0,034	11	0,024
Spot-4 [09/04/2010] - Formosat-2 [10/04/2010]	333	0,981	0,074	24	0,060
Spot-5 [10/04/2010] - Formosat-2 [10/04/2010]	333	0,993	0,045	14	0,036
Formosat-2 [21/05/2010] - Spot-5 [23/05/2010]	333	0,977	0,055	14	-0,038
Spot-4 [26/06/2010] - Spot-5 [27/06/2010]	333	0,970	0,039	17	0,027

Tableau 2 : Résultats des comparaisons des indices NDVI et MTVI2 dérivés des images acquises par Spot-4, Spot-5 et Formosat-2.

3.3. Bilan des acquisitions satellites multi-capteurs

Au cours de la campagne expérimentale, les acquisitions satellites ont été effectuées par différents instruments actifs et passifs, délivrant des produits à haute résolution spatiale (<10m), dans les domaines optique, proche infrarouge et micro-ondes.

L'utilisation des capacités de dépointage des antennes radar, couplée aux fauchées des images optiques, ont permis d'assurer 103 acquisitions sur une zone commune d'environ 100 km², entre janvier et décembre 2010 (Figure 32). Ces acquisitions sont réparties en 73 images radars (dont 40 en bande X, 26 en bande C et 7 en bande L) et 30 images optiques. Avec des écarts moyens compris entre 7 et 11 jours, elles sont régulièrement espacées, et couvrent les cycles culturaux et les états de surface associés (excepté en bande L). Les images radar délivrées par Radarsat-2 sont acquises avec 4 états de polarisation : HH, VV, HV et VH. Concernant Alos, les états de polarisation disponibles : HH ou HH et HV, sont dépendants des modes de fonctionnement de l'antenne (mode simple ou double polarisation). Enfin, les séries d'images TerraSAR-X sont acquises avec la co-polarisation horizontale, excepté trois images caractérisées par une co-polarisation verticale.

D'un point de vue échantillonnage temporel, la programmation des images a permis d'obtenir 25 dates où images optiques et radars sont disponibles avec un intervalle de temps maximum d'une journée (Figure 31). Concernant les images radars, les bandes X, C et L, sont acquises de manière quasi-synchrone à 6 reprises. Les dates combinant deux fréquences radars à plus ou moins un jour sont au nombre de 71. Elles sont à 89 % représentées par les bandes X et C, (soit 63 cas). Trois dates sont couvertes par les bandes C et L, et cinq par les bandes X et L.

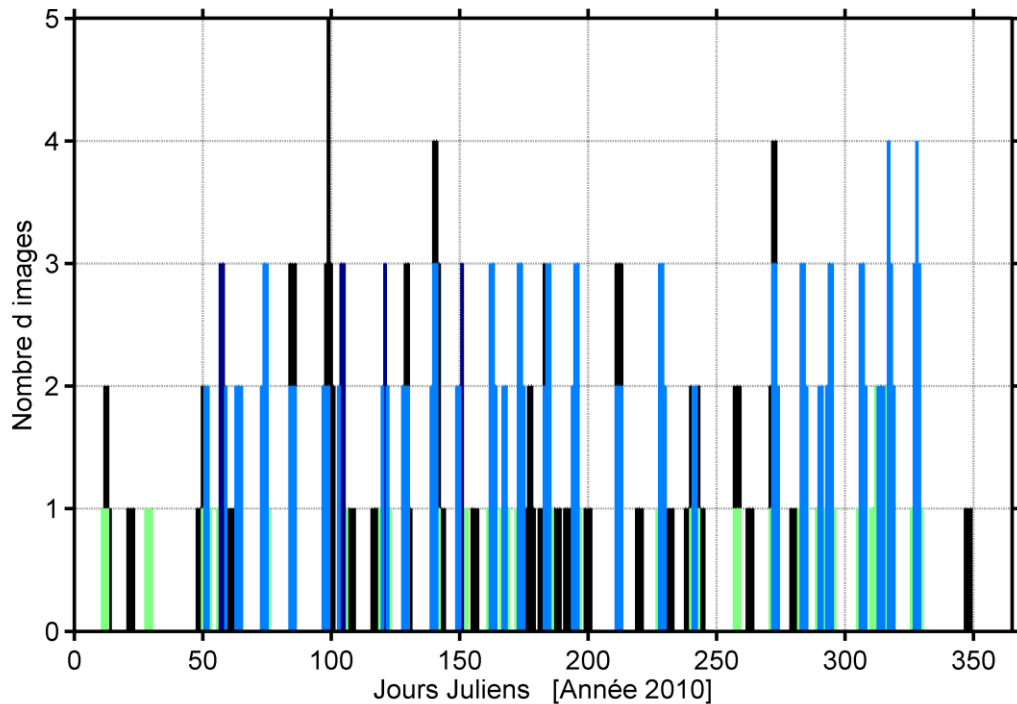


Figure 31 : Bilan du nombre d'images satellites acquises au cours de l'année 2010, à plus ou moins un jour. Pour les images radars, les couleurs verte, bleu claire et bleu foncée, correspondent à la présence d'une, deux ou trois fréquences. Le nombre cumulé d'images optique et radar est représenté en noir.

Les séries d'images Formosat-2, Radarsat-2 et TerraSAR-X (en mode Stripmap) couvrent au minimum 80 % du super site. Les images Alos et TerraSAR-X (en mode Spotlight) couvrent respectivement 62% et 23%, en raison du décalage des fauchées dans le premier cas, et d'une emprise restreinte dans le cas des produits Spotlight. L'information dérivée des différents produits satellites, indices de végétation (optique) et coefficients de rétrodiffusion (radar), est extraite à la parcelle.

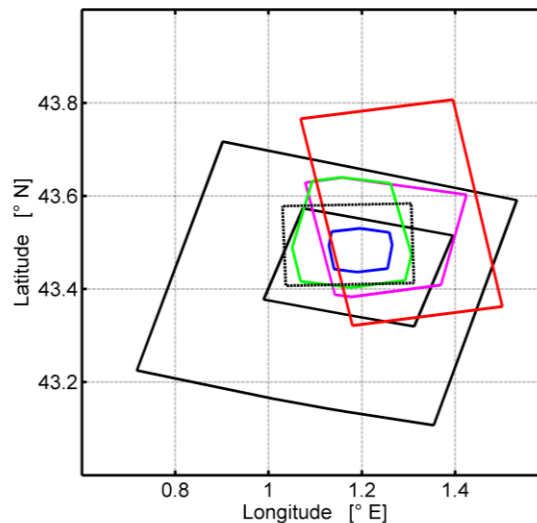


Figure 32 : Bilan des couvertures spatiales communes des produits satellites sur la zone d'étude (en pointillés). Pour les images radar, les couleurs rouge, verte, magenta et bleue correspondent aux zones communes aux images Alos, Radarsat-2, et TerraSAR-X en mode SM et SL. Les zones communes aux images Spot et Formosat-2 sont représentées en noir.

4. LES MESURES DE TERRAIN

4.1. Humidité de surface

L'humidité de surface ne représente qu'une part infime du stock d'eau planétaire (plus de 97 % étant stocké dans les océans). Malgré une importance faible d'un point de vue quantitatif, elle intervient dans de nombreux processus. Nécessaire au développement de la végétation, elle est en perpétuels mouvements ascendant ou descendant, vers l'atmosphère (par évaporation ou transpiration) ou la nappe (par percolation).

Cette zone de surface connaît une forte dynamique temporelle, en lien étroit avec les conditions climatiques. La teneur en eau augmente par exemple de manière brutale lors des précipitations, ou baisse proportionnellement à la demande climatique. A cette forte dynamique temporelle s'ajoute une variabilité spatiale liée aux caractéristiques du sol. Une quantité variable d'eau va ainsi être retenue, plus ou moins étroitement, par le maillage formé par éléments du sol (minéraux et organiques). En milieu agricole, la variabilité spatiale de l'humidité de surface peut être renforcée par les pratiques culturales mises en œuvre. Ainsi, la mise en place de drains au sein d'une parcelle, modifie à long terme les propriétés de percolation ; les effets de l'irrigation ou du labour ayant des conséquences immédiates.

En télédétection, seules les variations de la couche superficielle sont enregistrées par les différents capteurs. La sensibilité des données spatiales à la teneur en eau est liée aux changements de couleur de la surface dans l'optique, ou de constante diélectrique dans les micro-ondes. La configuration des instruments embarqués détermine les possibilités de suivi de l'humidité de surface (Anguela et al., 2010; Baghdadi et al., 2006b; Baghdadi et al., 2008; Champion and Faivre, 1997; Gherboudj et al., 2011; Le Hegarat-Masclé et al., 2002; Lievens and Verhoest, 2011; Paloscia et al., 2008; Rahman et al., 2008; Satalino et al., 2002; Ulaby and Batlivala, 1976; Ulaby et al., 1978; Ulaby et al., 1979; Zribi et al., 2005a; Zribi and Dechambre, 2003).

Les deux parties suivantes concernent les données collectées sur le terrain, avec la détermination de la loi d'étalonnage et le suivi spatial et temporel de l'humidité de surface. Chacune des parties est organisée selon le schéma suivant : Présentation des protocoles mis en œuvre, et présentation des résultats. La dernière partie traite de la correction des mesures d'humidité de surface afin de compenser l'écart temporel existant entre la mesure de terrain et les acquisitions satellites (qui se traduit par une perte ou un gain d'eau à la surface du sol).

4.1.1. Etalonnage des sondes portables

L'objectif est de déterminer une loi d'étalonnage servant à la conversion du signal délivré en mV, par les sondes portables ML2x de chez ThetaProbe (Figure 33), en humidité volumétrique, c'est-à-dire en mètre cube d'eau par mètre cube de sol ($\text{m}^3.\text{m}^3$), ou en pourcentage (%).

Protocole

La collecte des données a été effectuée au sein de huit parcelles (nommées P1 à P8), sélectionnées en fonction de leur type de sol, et de leur localisation géographique (Figure 12). Cinq parcelles d'intérêt sont situées dans la plaine alluviale (sol argilo-limoneux), et trois dans la zone des coteaux (sols argilo-calcaires). L'échantillonnage a été réalisé pour des conditions contrastées d'humidité du sol (sec et humide). Lors de chaque sortie, au minimum dix couples de mesures (humidité volumétrique / signal délivré par les sondes) ont été collectés, le long de transects préalablement établis sur chacune des parcelles.



Figure 33 : Sonde portable ML2x de chez ThetaProbe avec son boîtier d'enregistrement.

La méthode d'échantillonnage consiste à réaliser simultanément une mesure avec la sonde ThetaProbe, et un prélèvement de 250 cm³ de sol. Ce dernier sert à l'estimation de l'humidité volumique, la teneur en eau de l'échantillon étant déterminée de manière pondérale. Le prélèvement est pesé, mis à sécher durant 48 heures à 105°C, puis pesé de nouveau. Les prélèvements sont réalisés à l'aide d'un cylindre de 250 cm³. Ils permettent en outre une estimation de la densité apparente, qui est exprimée en gramme par centimètre cube (g.cm⁻³).

Résultats

Sur chacune des parcelles, une relation linéaire entre le signal délivré par la sonde (en mV), et l'humidité volumique (en %) est établie. La Figure 34 présente les différentes lois d'étalonnage. Les valeurs de densité sont matérialisées par un dégradé de couleur (g.cm⁻³).

Les valeurs d'humidité du sol sont très contrastées, couvrant une gamme comprise entre 3% au minimum (parcelle P7) et 42% au maximum (parcelle P1). Les relations linéaires illustrent également cette variabilité, avec des coefficients directeurs compris entre 0,027 et 0,060 % .mV⁻¹. La dispersion des mesures est maximale pour les parcelles situées à proximité d'Auradé, sur les sols argilo-calcaires (soit les parcelles P4, P5 et P8). Les erreurs associées aux lois d'étalonnage sont alors comprises entre 3,2 et 5,6%, et les coefficients de détermination varient entre 0,48 et 0,59. Concernant les parcelles localisées dans la plaine alluviale (P1, P2, P3, P6 et P7), la dispersion des mesures est moindre. Les coefficients de détermination sont alors supérieurs à 0,83, et l'erreur sur l'estimation de l'humidité de surface inférieure à 3,3%. Quelle que soit les parcelles, une tendance (plus ou moins marquée) entre la densité et la valeur d'humidité de surface est observée. En effet, les plus fortes valeurs d'humidité du sol sont souvent obtenues sur des sols présentant une densité plus élevée (P2, P6, P7 et P8).

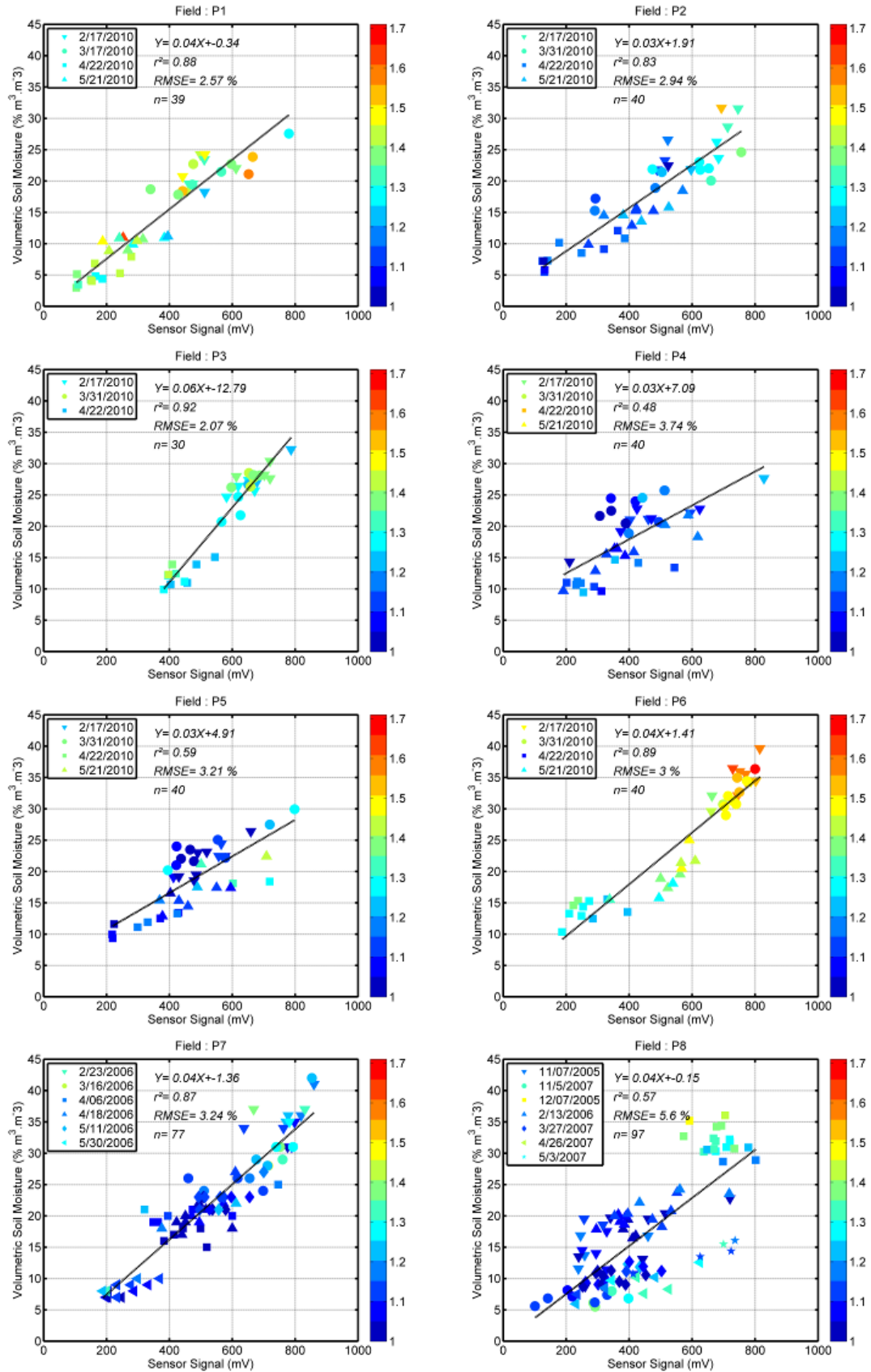


Figure 34 : Lois d'étalonnage des sondes ThetaProbe déterminées sur les 8 parcelles étalons. Les différentes formes des figurés correspondent aux dates de mesure, alors que les couleurs sont associées à la densité apparente (g.cm^{-3}).

A partir de ces résultats, deux fonctions d'étalonnage sont envisagées, afin de convertir le signal délivré par les sondes portables en humidité volumique :

- Une première relation (H_{SOL_M1}), applicable à l'ensemble des transects réalisés au sein de la zone d'étude, est basée sur l'intégralité des mesures (Equation 21). Le coefficient directeur est alors de 0,040 % par mV. Il est associé à une erreur de 4,1% et un coefficient de détermination de 0,75. Cette relation permet d'avoir une assez bonne estimation de l'humidité à l'échelle du paysage, et d'en dégager les grandes tendances. Elle est appliquée dans les résultats présentés dans le Chapitre II de cette thèse, où seules les tendances en humidité sont nécessaires pour l'analyse des signatures temporelles des signaux radars.

$$H_{SOL_M1} = 0,040 \times \text{Signal ThetaProbe} + 0,145 \quad \text{Equation 21}$$

- La seconde solution consiste à considérer deux fonctions de calibration, dépendantes de la localisation des parcelles et du type de sol. Les mesures réalisées à proximité d'Auradé sont alors regroupées, et séparées de celles réalisées dans la plaine alluviale selon les équations suivantes :

$$H_{SOL_M2_Auradé} = 0,034 \times \text{Signal ThetaProbe} + 2,432 \quad (R^2=0,54, RMSE=4,9\%) \quad \text{Equation 22}$$

$$H_{SOL_M2_Lamaquère} = 0,042 \times \text{Signal ThetaProbe} - 0,552 \quad (R^2=0,88, RMSE=3,2\%) \quad \text{Equation 23}$$

Ces fonctions sont mises en œuvre dans le Chapitre III de cette thèse, où une estimation précise de l'humidité de surface est nécessaire pour la modélisation des signaux radar en période de sol nu.

4.1.2. Suivi spatio-temporel de l'humidité de surface

L'objectif de ces mesures est de rendre compte de l'évolution temporelle et de la variabilité spatiale de l'humidité de sol sur l'horizon superficiel (0-5 cm), afin d'en analyser l'impact sur les signaux satellites (Chapitres II et III). Ces mesures ont été effectuées de manière quasi-synchrone avec les acquisitions satellites ($\Delta t < 1$ jour pour la majorité des mesures).

Protocole

Le suivi de l'humidité de surface sur l'ensemble de la zone d'étude s'effectue à l'aide de sondes portables identiques à celles utilisées pour l'étalonnage (ML2x de chez ThetaProbe). Les mesures sont réalisées tous les 10 à 20 pas, le long de transects présentés sur la Figure 12. La distance cumulée des transects atteint 12,8 km, elle oscille entre 40 et 640 m, selon les parcelles considérées. Ce protocole est utilisé lors de 26 missions terrains.

Deux autres sorties de terrain ont été effectuées avec un protocole beaucoup plus rapide, lorsque de fortes précipitations précédaient des acquisitions satellites, permettant ainsi de connaître le niveau de l'humidité du sol juste après la pluie. Le suivi consiste alors à effectuer seulement 16 mesures, dans d'un carré de 16 mètres de côté, au sein d'une zone homogène.

Au final, lors des 28 missions terrains effectuées, plus de 26000 mesures ont été réalisées. Tous ces points sont géo-référencés, et associées à une date et heure. Cette information temporelle est ensuite utilisée pour la correction des mesures d'humidité dans la section 4.1.3.

Résultats

Les résultats sont présentés selon 3 sections : la première présente une analyse globale de l'humidité du sol sur l'ensemble des 37 parcelles. La seconde section analyse la variabilité observée sur chacune des parcelles. Enfin, la dernière section détaille les résultats obtenus à l'échelle des transects (intra-parcellaire).

Analyses globales

La Figure 35a présente l'évolution temporelle de l'humidité de surface, ainsi que les valeurs journalières des précipitations et d'évapotranspiration potentielle de référence (variable déduite des mesures météorologiques acquises à Lamasquère, conformément à la méthode décrite dans Allen et al., 1998). Pour chacune des 28 dates, les valeurs moyennes d'humidité (\overline{HSS}) et les écarts types (σ_{HHS}) sont déduits des mesures collectées sur l'ensemble des 37 parcelles échantillonnées. Les coefficients de variation des mesures ($Cv = \sigma_{HHS} / \overline{HSS}$) sont présentés sur la Figure 35b.

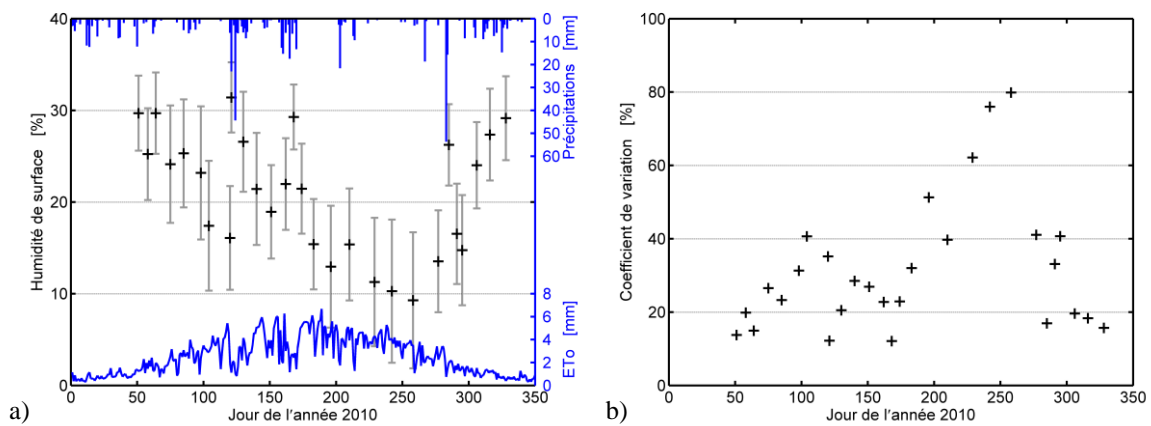


Figure 35 : Evolutions temporelles de l'humidité de surface du sol (moyenne (+), et écarts types (en gris)), des précipitations mesurées à Lamasquère et de l'évapotranspiration potentielle (ET_0), a), ainsi que des coefficients de variation, b).

Au cours de l'année, les valeurs d'évapotranspiration potentielle de référence augmentent progressivement pour atteindre 6 mm par jour lors des mois d'été (Figure 35a). Elles baissent par la suite et retrouvent des valeurs comparables à celles du début de l'année (inférieures à 1 mm). Concernant les précipitations, après quelques événements pluvieux inférieurs à 10 mm en début d'année, deux épisodes plus importants sont observés en mai et juin. Le cumul journalier le plus important est enregistré le 10 octobre, avec 54 mm. Enfin, des précipitations moins importantes mais régulières sont observées en fin d'année.

En début et fin d'année, l'évolution des valeurs moyennes d'humidité de surface est cohérente avec l'intensité des épisodes pluvieux et les valeurs d' ET_0 . Les valeurs diminuent lors de périodes d'assèchement de la surface, caractérisées par une absence ou de faibles précipitations (inférieures à 15 mm). À l'inverse, elles augmentent suite aux épisodes pluvieux plus marqués (l'amplitude de cette dynamique étant pondérée par le niveau d' ET_0). La valeur moyenne maximale est ainsi observée durant l'épisode pluvieux du mois de mai, l'humidité de surface dépasse alors les 30%. Les mois d'été, la période d'assèchement de la surface est quasi continue, même si plusieurs précipitations sont enregistrées. Les valeurs minimales, observées entre la fin du

mois d'août et le début de septembre, sont alors proches des 10%, en lien avec les niveaux élevés d' ET_0 . Les valeurs du mois de novembre sont comparables à celles collectées en février (~30%).

La variabilité associée aux valeurs moyennes est importante, comme en témoignent les valeurs des écarts types, comprises entre 3,5 et 7,8% (Figure 35a). Aux faibles valeurs d'humidité de surface sont associées une importante variabilité, avec des coefficients de variation au maximum de 80% (Figure 35b). A l'inverse les valeurs maximales sont caractérisées par une variabilité minimale, et des coefficients de variation inférieurs à 20%. Ces deux paramètres montrent une forte association, avec une décroissance exponentielle prononcée.

Analyse multi-parcellaires

La dynamique temporelle de l'humidité de surface observée dans l'analyse globale (Figure 35) est à rapprocher des comportements spécifiques observés au sein de chaque parcelle. La Figure 36 propose trois exemples d'évolution temporelle d'humidité de surface collectée au sein des parcelles de blé, de maïs, et de soja située à moins de 15 km les unes des autres (parcelles N, B1, et D, Figure 12). Outre la culture, ces parcelles se distinguent par les différences de pratiques culturales mises en œuvre (pas d'irrigation dans le cas du blé, présence d'un drain pour la parcelle de maïs), et les conditions édaphologiques variées (profondeur et texture du sol). Sur chacune des figures, les écarts types représentent la variabilité observée au sein du transect effectué sur la parcelle. Les précipitations collectées par la station météorologique la plus proche sont également représentées (Lamasquère, pour les exemples ci-dessous). La période de végétation est matérialisée par la hauteur de la culture.

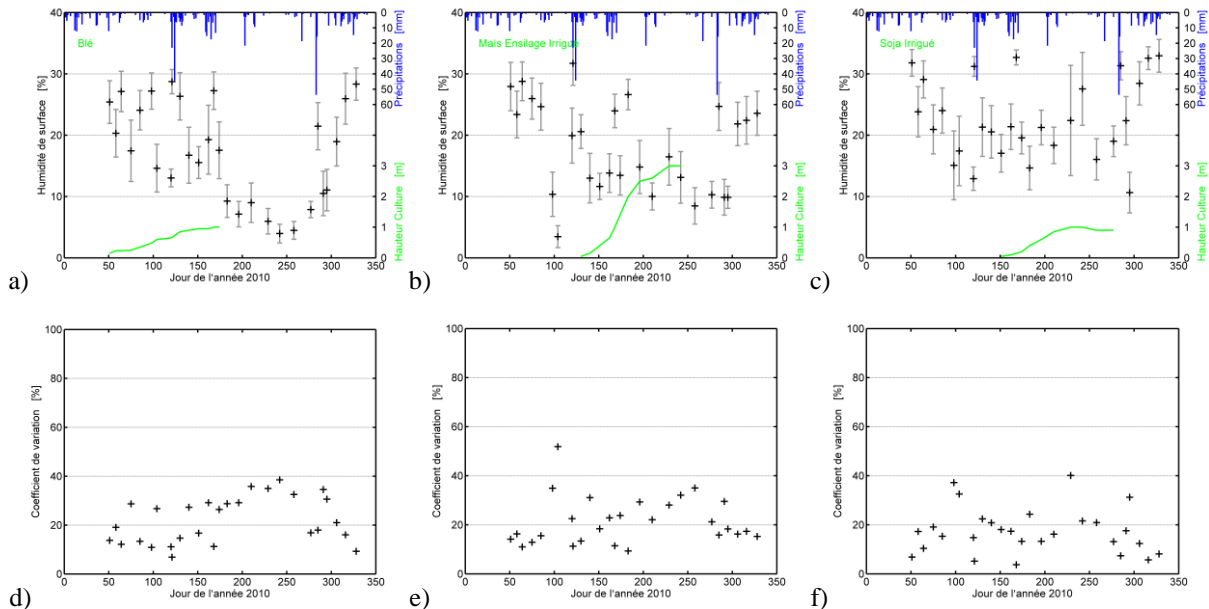


Figure 36 : Evolutions temporelles de l'humidité de surface (+), des précipitations et de la hauteur de la culture, au sein de trois parcelles à l'occupation du sol contrastées : blé a), maïs b) et soja c). Pour chaque parcelle, les valeurs d'humidité moyennes (mesurées le long du transect) sont encadrées des écarts types. Evolutions temporelles des coefficients de variation correspondant, d), e) et f).

De forts contrastes apparaissent entre les différentes parcelles suivies. Les nuances observées concernent les valeurs extrêmes atteintes, l'évolution temporelle des valeurs moyennes et la variabilité associée. L'humidité de

surface collectée au sein la parcelle de blé (Figure 36a) présente une évolution temporelle comparable à celle observée sur la Figure 35. Les valeurs minimales, voisines de 5%, sont observées durant les mois d'août et de septembre, alors que la surface est dépourvue de végétation. Les valeurs maximales, proches des 29%, suivent les événements pluvieux, ou les périodes à faible demande évaporative. Les valeurs maximales des écarts types (supérieures à 5%) sont observées lorsque l'humidité de surface est proche de 17%. Ces dates sont associées à des coefficients de variations compris entre 30 et 40%, au même titre que les valeurs minimales d'humidité (Figure 36d).

Au sein de la parcelle de maïs, la valeur minimale (de 4%) est observée en période de sol nu, avant émergence de la culture (Figure 36b). Concernant la parcelle de soja, cette valeur minimale, excédant les 10%, suit la période d'assèchement de l'horizon de surface après récolte de la culture (Figure 36c). Sur cette parcelle les valeurs maximales d'humidité moyenne dépassent les 30%. Au sein des deux parcelles irriguées (cultures de maïs et de soja), la variabilité maximale est observée durant les périodes d'irrigation. Les écarts types peuvent alors atteindre 9% (cas de la parcelle de soja). Concernant les coefficients de variations, les valeurs sont également importantes lors des périodes d'assèchement de la surface (Cv supérieurs à 35%). En outre, l'humidité du sol évolue de manière très contrastée sur ces deux parcelles en début d'année, alors que l'état de surface est voisin. Durant cette période de sol nu, la différence de comportement est causée par la combinaison de différents processus, comme par exemple, la présence ou l'absence d'un drain, la différence marquée de profondeur (30 cm dans un cas, contre plus de 200 cm dans l'autre) et de texture de sol.

Les trois exemples proposés sur la Figure 36 sont représentatifs de la forte variabilité des comportements observés sur l'ensemble des 37 parcelles. Aucune parcelle n'offre une évolution de l'humidité du sol similaire, et il serait faux de ne considérer qu'une seule parcelle pour décrire l'humidité du sol à l'échelle d'un paysage agricole.

Analyse à l'échelle des transects

Dans certains cas, la variabilité observée au sein des différentes parcelles est issue des comportements particuliers de l'humidité, le long du transect de mesure. La Figure 37 présente trois exemples où la variabilité observée peut être expliquée par des pratiques culturales, ou des conditions de sol (parcelles D, K et N).

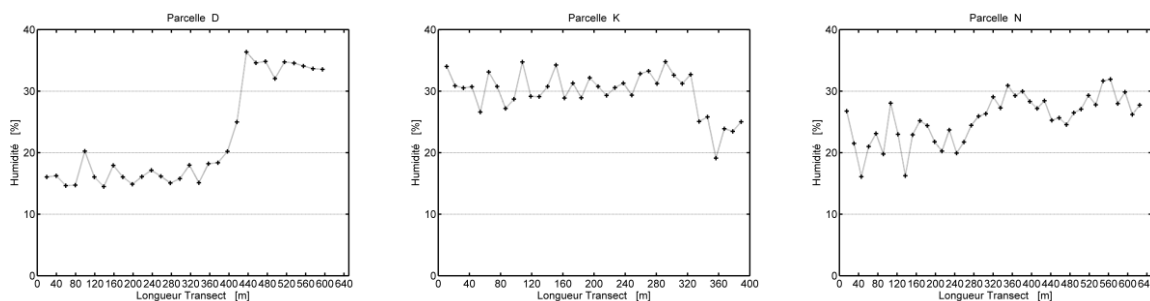


Figure 37 : Exemples d'évolution de l'humidité de surface le long de transects, au sein des parcelles D, K et N.

Concernant le premier exemple, deux niveaux d'humidité de surface sont observés le long du transect. Les valeurs d'humidité sont inférieures à 20%, le long des 400 premiers mètres du transect ; alors que les 150 derniers mètres, sont associés à une humidité dépassant les 30%. Cette différence de niveau d'humidité est

causée par l'irrigation en court lors de la collecte des données terrain dans les derniers mètres du transect. Concernant le second exemple, les observations sont similaires, avec deux niveaux d'humidité le long du transect. Le profil est inversé : les premiers mètres étant associés aux valeurs élevées (proches de 30%), les derniers, à des valeurs voisines de 25%. Cette différence de niveau d'humidité est liée aux conditions de sol, à savoir des différences de texture et de profondeur le long du transect (meilleur drainage sur la fin du transect). Concernant le dernier exemple, les valeurs d'humidité de surface augmentent assez régulièrement le long du transect. Elles sont voisines des 20% dans les premiers mètres, et atteignent les 30% en fin de transect. Cette tendance est liée à une augmentation de la teneur en argile le long du transect (section 4.3). Ces fortes variabilités de l'humidité de surface à l'échelle d'un transect sont rares sur les 37 parcelles. Il est important d'identifier les parcelles concernées car les analyses des signaux de télédétection se font sur la base de la moyenne parcellaire de l'humidité de surface dans les Chapitres II et III.

4.1.3. Synchronisation des mesures avec les acquisitions satellites

Les mesures d'humidité collectées au sein des différentes parcelles varient entre 3% et 42%. Au cours d'une même journée, les variations du contenu en eau de la couche de surface peuvent être importantes. Les valeurs d'humidité de surface peuvent effectivement passer d'une valeur minimale à la saturation, suite à un événement pluvieux ou à une irrigation par exemple. À l'inverse, les pertes d'eau en surface peuvent être importantes lors des journées d'été en lien avec la forte demande évaporative ($\sim 6 \text{ mm.j}^{-1}$). Lors de la campagne de mesure *MCM'10*, les acquisitions satellites et les mesures terrain ont été réalisées de manière quasi synchrone ($\Delta t \sim 1$ jour dans la majorité des cas). Dans le détail, le décalage temporel médian est de 11 heures vis-à-vis des images Alos (allant de 5,5 à 16,5 heures), de 20,5 heures vis-à-vis des images Radarsat-2 (compris entre 0 et 91,5 heures), et de 18 heures vis-à-vis des images TerraSAR-X (oscillant entre 0,5 et 127 heures). Il était impossible d'effectuer l'ensemble des mesures de terrain au moment exact du passage des satellites en raison du grand nombre de parcelles suivies dans la journée ($\sim 12,8 \text{ km}$ de transect, nécessitant au minimum 10 heures à 2 expérimentateurs).

L'objectif de cette section est donc de présenter la méthode de correction temporelle utilisée afin d'estimer à priori les valeurs d'humidité du sol lors du passage exact du satellite, à partir des mesures effectuées en décalé.

Méthode – Modèle réservoir avec un sens des simulations fonction de la chronologie relative

La méthode mise en œuvre est basée sur les données d'humidité de surface régulièrement collectées au cours de l'année 2010, et sur les variables météorologiques acquises à Lamasquère et Auradé. Ces dernières, collectées à une fréquence semi-horaire, sont utilisées afin de calculer l'évapotranspiration potentielle de référence (conformément à la méthode FAO, Allen et al., 1998).

Ces données sont par la suite utilisées au sein d'un modèle de type réservoir, afin de rendre compte de l'humidité de l'horizon superficiel. Le modèle réservoir est constitué de deux horizons, un superficiel de 5 cm (correspondant à la profondeur échantillonnée), et un profond. Le modèle fonctionne au pas de temps semi-horaire, avec comme variables d'entrée : les mesures d'humidité de surface (% vol), les précipitations (mm), les

irrigations (mm), l'évapotranspiration potentielle de référence (mm), les humidités à la capacité au champ (% vol) et résiduelle (% vol), qui sont dérivées des valeurs extrêmes mesurées sur le terrain (pour chaque parcelle).

Un bilan hydrique est réalisé à l'échelle de la parcelle, il débute à partir de chaque mesure d'humidité de surface. Les différentes variables entrant dans la constitution du bilan sont alors additionnées ou soustraites, afin de rendre compte des niveaux d'humidité de surface lorsque les acquisitions suivent ou précèdent la mesure terrain.

Concernant les corrections appliquées dans le sens chronologique, les valeurs d'humidité sont augmentées des valeurs de précipitation et des quantités d'eau dispensées par irrigation (renseignées par les exploitants). La moitié de l'évapotranspiration est soustraite pour terminer le bilan (l'évapotranspiration potentielle de référence étant relative à l'horizon supérieur, qui correspond aux 10 premiers centimètres dans la méthode FAO). Les termes du bilan sont inversés, lorsque les simulations sont réalisées dans le sens anti-chronologique. Les valeurs d'humidité sont bornées par les valeurs maximales et minimales mesurées le long de chacun des transects.

Pour chacune des 37 parcelles, une valeur d'humidité de surface est retenue, à l'heure de passage du satellite (temps de passage arrondi à la ½ heure).

Résultats

La Figure 38 présente un exemple d'évolution temporelle de l'humidité de surface sur les parcelles A1 et R. Les mesures terrains sont représentées par des croix noires, alors que les valeurs d'humidité corrigées du décalage temporel sont en couleur (avec des figurés dépendant des satellites considérés). La variation d'humidité de surface, durant l'intervalle acquisition satellite/mesure terrain, est représentée par un trait continu. Cette variation est minimale dans la plupart des cas, avec des différences entre les valeurs mesurées, et celles simulées inférieures à 1%. Les valeurs corrigées sont fortement contrastées, seulement pour un faible nombre d'acquisitions où des précipitations ont eu lieu (une dizaine de cas sur 71 acquisitions).

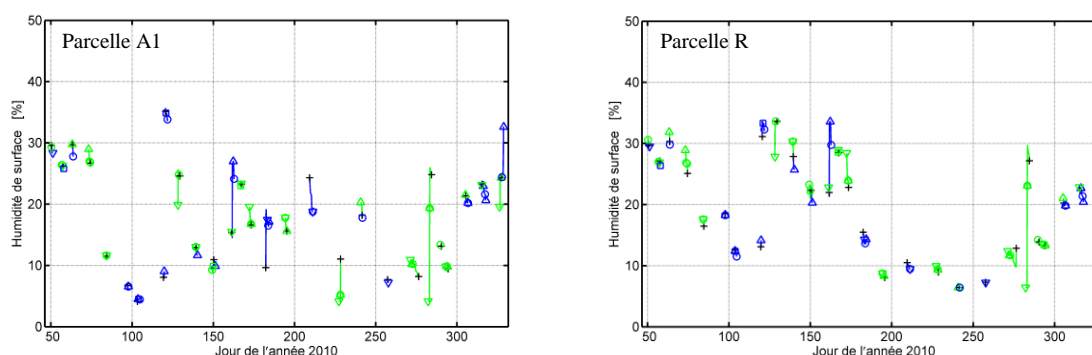


Figure 38 : Evolutions temporelles des humidités mesurées et corrigées des effets du décalage temporel entre acquisition satellite et collecte terrain. Les couleurs distinguent les acquisitions précédant (en vert) et suivant (en bleu) les mesures terrain, les satellites étant associés à différents figurés (▼ et ▲ pour TerraSAR-X, ● pour Radarsat-2 et ■ pour Alos).

La Figure 39 présente la comparaison entre les valeurs d'humidité mesurées et celles corrigées, pour la même parcelle. Les différences entre ces valeurs sont minimales dans le cas des acquisitions réalisées par Alos, avec un écart de 0,55%. Les différences sont plus importantes concernant Radarsat-2 et TerraSAR-X, avec respectivement des erreurs de 3,04 et 4,96% en moyenne. Néanmoins, dans la plupart des cas, les différences

entre humidités mesurées et corrigées sont minimales. Les plus fortes corrections ne s'expliquent pas par un écart temporel important (Figure 39), mais par des conditions météorologiques particulières.

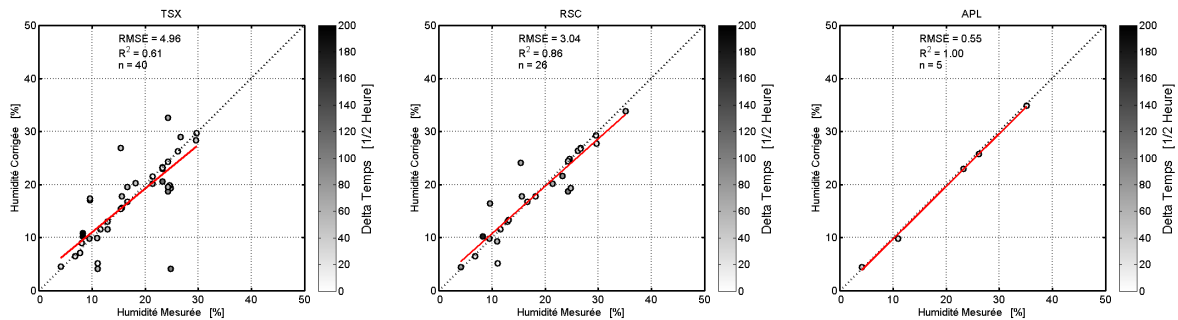


Figure 39 : Comparaison entre les valeurs d'humidité de surface mesurées, et celles corrigées du décalage temporel pour les acquisitions réalisées par les satellites TerraSAR-X, Radarsat-2 et Alos.

La Figure 40 montre une synthèse des résultats obtenus sur l'ensemble des trente-sept parcelles suivies. L'impact de la correction est alors d'autant plus important que la valeur du coefficient de détermination est faible et que l'erreur relative est élevée. Les différences entre humidités mesurées et corrigées sont minimales lors des acquisitions réalisées avec Alos, avec des erreurs inférieures à 1%. Cette faible différence s'explique par le nombre restreint d'images acquises avec ce capteur, et par le faible décalage temporel entre acquisition satellite et mesures terrain (11 heures). Concernant Radarsat-2 et TerraSAR-X, les différences entre les humidités mesurées et corrigées sont associées à des erreurs comprises entre 1 et 7 %. Le nombre d'images plus important, ainsi que le décalage de certaines dates expliquent cette différence.

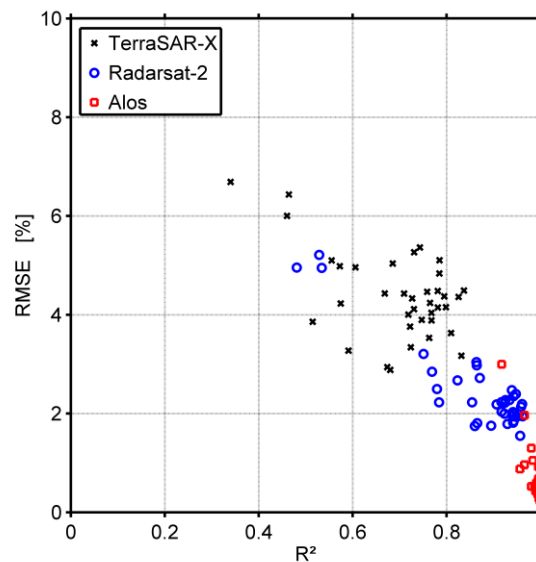


Figure 40 : Paramètres statistiques (R^2 et RMSE) illustrant la comparaison entre les valeurs d'humidité mesurées, et celles corrigées du décalage temporel, pour les 37 parcelles suivies.

4.2. Rugosité du sol

La rugosité peut être définie de différentes manières. En milieu agricole, elle correspond au macro-relief formé par les éléments périodiques (sillons, buttes...) et apériodiques (mottes de terres, graviers...), résultant du travail du sol. Différents modelages artificiels de la surface découlent de l'application des pratiques de labour, déchaumage, hersage ou binage. Les objectifs de ces pratiques agricoles sont divers : enfouissement (d'engrais, de résidus...), destructions de plantes nuisibles (adventices, végétation inter-culture...) ou modification des propriétés du sol (décompaction, préparation au semis...). La mise en œuvre de ces opérations est fonction du type de culture, de l'état du sol, des habitudes des exploitants ou de recommandations en vigueur. En outre, cette rugosité de surface intervient à des degrés divers, dans des processus tels que l'atténuation de la force du vent, l'évaporation ou l'écoulement des eaux.

En télédétection, l'influence de la rugosité sur les signaux est variable, dépendante de l'état de rugosité et des caractéristiques des capteurs (en termes de longueur d'onde, d'état de polarisation, d'angle d'incidence ou de direction de visée) (Callens et al., 2006; Davidson et al., 1998; Davidson et al., 2000; Jackson et al., 1997; Mattia et al., 1997; Ulaby et al., 1978; Zribi et al., 2005c).

Au cours de la saison de culture, la rugosité de surface évolue de manière brusque, lors de chaque travail du sol, puis plus lentement, sous l'effet des précipitations, de l'alternance gel/dégel ou du vent (érosion climatique). Le suivi de ce paramètre impose donc une veille régulière. Durant la campagne de mesure *MCM'10*, le suivi de la rugosité de surface est effectué de manière qualitative et quantitative, par la mise en œuvre des protocoles présentés dans le paragraphe 4.2.1. Dans cette partie sont également évoqués les traitements permettant d'obtenir les paramètres statistiques décrivant l'état de surface (à savoir la hauteur quadratique moyenne h_{rms} , la longueur de corrélation lc et la fonction d'auto-corrélation Lc). Un algorithme d'érosion est également décrit afin de rendre compte des effets climatiques sur la rugosité.

4.2.1. Protocole de mesure

Deux protocoles sont utilisés pendant la campagne *MCM'10* afin de caractériser la rugosité de surface. Le premier consiste à décrire la rugosité de manière qualitative, lors de chaque sortie effectuée. Différents termes sont associés aux états de rugosité de surface observés sur le terrain.

Le second protocole consiste à estimer la rugosité de surface de manière quantitative à l'aide d'un rugosimètre à aiguilles, après chaque changement d'état consécutif à un remodelage de la surface. A titre d'exemple, la Figure 41 présente des photographies du rugosimètre à aiguille sur quatre états de rugosité contrastés.



Figure 41 : Photographies du rugosimètre à aiguille réalisées sur quatre états de rugosité : préparé motteux a), déchaumé b), travaillé c), et labouré d).

D'une longueur de 2 mètres, l'appareil de mesure est constitué de 201 aiguilles espacées d'un centimètre. En se posant sur la surface, ces aiguilles vont reproduire le microrelief du sol. Une photo du rugosimètre permet de figer le profil du sol, matérialisé par l'extrémité des aiguilles (aiguilles munies d'un stock rouge sur la Figure 41). Sur les 37 parcelles suivies, à chaque changement d'état (passage d'un sol préparé, à un sol déchaumé ou à un labour...) deux profils de 2 mètres sont réalisés parallèlement au sens du travail de la parcelle, et deux autres profils sont réalisés perpendiculairement.

4.2.2. Traitement des données

Les couples de photos sont numérisés et associés afin d'obtenir des profils de 4 mètres. La tendance de premier ordre est retirée, afin de soustraire l'effet de la pente locale due au non parallélisme entre le sol et le rugosimètre.

Une description statistique de la rugosité est fournie par hauteur quadratique moyenne (h_{rms}). Elle est calculée conformément à l'équation suivante :

$$h_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N z_i^2 - N \bar{z}^2} \quad \text{avec} \quad \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad \text{Équation 24}$$

où N correspond au nombre d'échantillons, et z_i les valeurs discrètes des hauteurs du profil.

La dépendance entre deux points successifs du profil de rugosité est estimée par le biais de la fonction d'auto-corrélation (L_c) :

$$L_c(x') = \frac{\sum_{i=1}^{N+1-j} z_i z_{j+i-1}}{\sum_{i=1}^N z_i^2} \quad \text{avec} \quad x' = (j-1) \Delta x \quad \text{Équation 25}$$

où Δx correspond à la distance entre deux aiguilles (1 cm).

Ulaby et al., 1982 définissent une distance pour laquelle la corrélation entre les points n'existe plus ($L_c(x')=1/e$), ou la longueur de corrélation (lc). Elle dépend de la fonction de corrélation considérée, qui est de forme exponentielle (pour les faibles rugosités (Altese et al., 1996)), et gaussienne (pour les fortes (Mingam, 2010)).

4.2.3. Analyses des résultats

Au cours de la campagne de mesure, 117 mesures de rugosité ont été effectuées (~3 niveaux de rugosité en moyenne par parcelle au cours de l'année). Précisément, le nombre d'opération du sol varie entre 1 et 6 en fonction des pratiques culturales mises en œuvre.

La Figure 42 présente les valeurs des paramètres caractérisant les états de surface. Les variables, h_{rms} et lc , sont dérivées des profils parallèles et perpendiculaires (Figure 42a et b). Leurs valeurs sont supérieures dans le sens perpendiculaire, comme en témoignent les moyennes de h_{rms} : 2,2 cm (contre 1,5 dans le sens parallèle), ou de lc avec 7,7 cm (contre 4,4). A chaque valeur est associée une information qualitative, déterminée visuellement sur le terrain. L'état de surface qualifié de « labouré » présente les plus fortes valeurs de h_{rms} (avec des moyennes de 3,4 et 4,4 cm dans les sens parallèles et perpendiculaires), et se distingue des autres niveaux de rugosité. Il représente 11% des profils collectés, et est associé à une forte variabilité, comme en témoigne les valeurs des coefficients de variation, variant entre 25 et 45% selon le paramètre et le sens considérés. Les états « travaillé » et « déchaumé » représentent respectivement 14 et 23% des profils collectés. Ils sont associés à des valeurs de h_{rms} assez proches, avec en moyenne 1,5 et 1,8 cm dans le sens parallèle, et 2,7 et 2,4 cm dans le sens perpendiculaire. Ils sont par conséquent difficilement séparables, d'autant qu'ils présentent une forte dispersion, avec des coefficients de variation supérieurs à 30%. Les états « préparés » représentent plus de la moitié des mesures de rugosité (25% pour l'état « motteux », et 27% pour le « lisse »). Ils sont associés à des valeurs de h_{rms} assez proches, inférieures à 2 cm en moyenne. Les valeurs de lc sont plus contrastées, avec des moyennes plus importantes pour l'état « lisse », comparé au « motteux » (avec 4,4 contre 2,5 cm dans le sens parallèle, et 8,5 contre 6,0 dans le sens perpendiculaire).

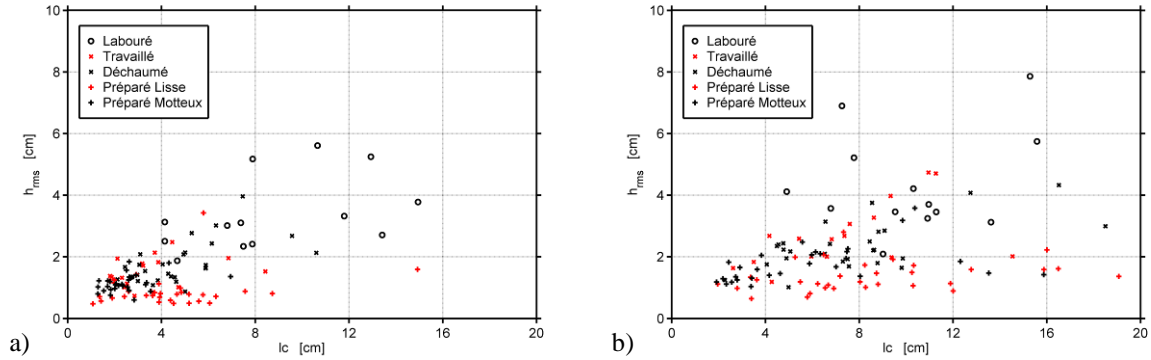


Figure 42 : Relation entre h_{rms} et l_c , estimées à partir des profils parallèles a) et perpendiculaires b) de rugosité.

Lors de la saison agricole, la majorité des changements d'état de rugosité de surface sont observés au cours de deux périodes : au printemps et en automne. La Figure 43 présente le nombre de mesures effectuées (après chaque changement d'état), en fonction du temps. Les 4 premières dates sont à exclure car elles correspondent aux mesures de l'état initial. Il n'y avait donc pas forcément de changement de rugosité. Une première période de changements d'état de surface est observée durant les mois d'avril et de mai, avec un nombre de changements atteignant un total de 29 (soit 34% en excluant les 4 premières dates). Les parcelles allouées aux cultures d'été (maïs, soja, tournesol) sont alors travaillées, différents états de surface se succédant jusqu'au semis. La seconde période de travail du sol intervient entre les mois d'octobre et de novembre. Durant cette période, le nombre de changement atteint un total de 37 (soit 44%). Différents cas sont alors observés, certains travaux précèdent le semis des cultures d'hiver (blé, colza), d'autres sont mis en œuvre afin d'enfouir les résidus de surface et/ou décompacter l'horizon supérieur.

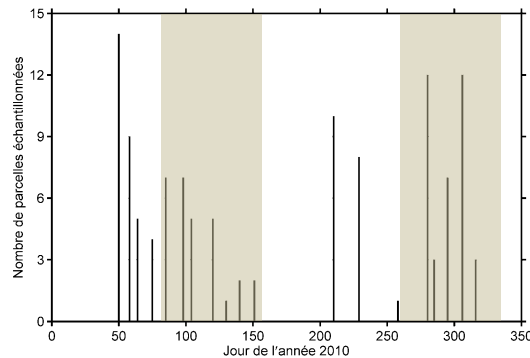


Figure 43 : Nombre de parcelles échantillonnées au cours de l'année 2010.

La Figure 44 présente deux exemples de parcelles (A1 et AJ), où les niveaux de rugosité observés au cours de la saison agricole sont contrastés. Entre deux changements d'état, la longueur de corrélation est considérée comme constante (traits pleins en rouge, Figure 44). Concernant la hauteur quadratique moyenne, une évolution temporelle du paramètre est envisagée, sur la base des travaux de Zobeck and Popham, 1997 (traits en pointillés en noir, Figure 44). Dans cette étude, l'auteur met en évidence une érosion de la rugosité de surface suite à l'effet des précipitations. Les valeurs de h_{rms} érodées sont ainsi dérivées d'une relation exponentielle décroissante, prenant en compte le cumul de précipitation (mais pas l'intensité des événements pluvieux). Ce cumul est réalisé avec les événements pluvieux excédant 1 mm au cours d'une journée (afin de limiter les effets des faibles

précipitations). D'autre part, les valeurs minimales de h_{rms} érodés sont bornées à des seuils différents, en fonction des états de surface initiaux (par exemple, à 1 cm dans le cas des états préparés motteux, ou à 3 cm pour un labour). A titre indicatif, les niveaux constants de h_{rms} sont représentés en traits pleins noir sur la Figure 44 (sans prise en compte de l'érosion).

Concernant les exemples présentés ci-dessous, les niveaux de h_{rms} sont minimums lorsque la culture est en place. Les valeurs sont alors proches de 1 cm, ils correspondent à l'état qualifié de 'préparé lisse' (PL). En dehors de cette période de culture, les niveaux de rugosité observés au sein de ces parcelles sont contrastés. Sur la parcelle de blé (Figure 44a), la rugosité augmente suite à un modelage après la récolte, les valeurs associées à l'état 'déchaumé' (D), sont maximales. Par la suite, la surface est 'travaillée' (T) avant la mise en place de la culture d'hiver, associée à un état 'préparé motteux' (PM). Sur la parcelle de maïs, les changements d'états de surface interviennent en début d'année, où se succèdent l'état 'préparé lisse' (PL) (témoin de la culture précédente) et 'labouré' (L). Suite à la récolte, des apports de matière organiques sont réalisés, la surface est alors 'travaillée' (T).

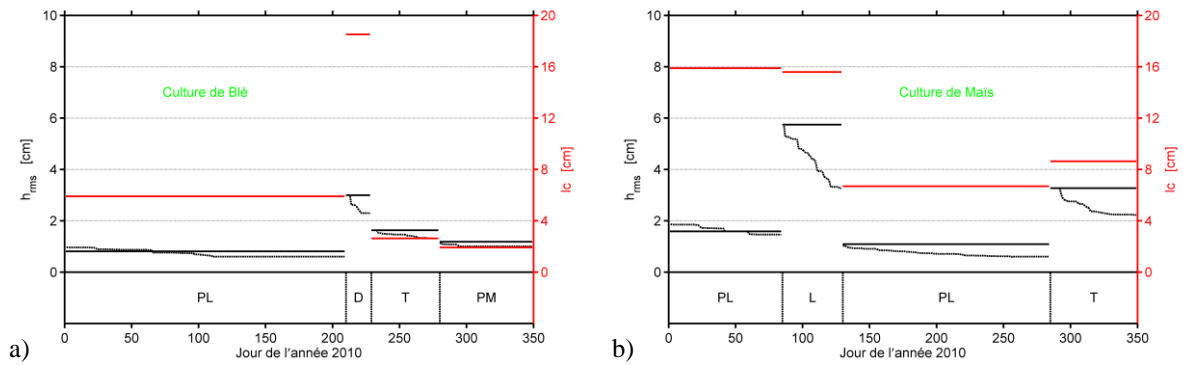


Figure 44 : Exemples d'évolutions temporelles de la rugosité de surface (h_{rms} et lc) des parcelles AJ et A1. Concernant la hauteur quadratique moyenne, les figurés en pointillé correspondent à la prise en compte de l'érosion sur le paramètre h_{rms} .

4.3. Texture et pierrosité

Les sols peuvent être scindés en quatre compartiments, des phases solides, liquides et gazeuses et des organismes vivants, qui échangent matière et énergie. La capacité de rétention de l'eau dans les sols est majoritairement liée à la taille des éléments qui le composent. Les sols composés d'éléments fins, comme l'argile, sont susceptibles de retenir d'importantes quantités d'eau, à l'inverse des sols sableux, qui présentent des quantités d'eau libre supérieures. Les forces de rétention de l'eau sont principalement matricielles, dues à la nature poreuse des sols (forces capillaires), et à la présence de minéraux argileux (forces d'absorption) à l'échelle moléculaire. Dans certains cas, les forces osmotiques jouent également un rôle non négligeable (après l'apport de substances fertilisantes, par exemple).

La permittivité des sols dépend des différents constituants du sol, et principalement de la teneur en eau (la permittivité de l'eau étant largement supérieure à celle de l'air, des minéraux ou de la matière organique). En jouant sur la capacité de rétention de l'eau, la composition du sol en éléments dont la taille est inférieure à 2 mm (ou texture) va influencer les propriétés diélectriques du sol, comme en témoignent les travaux menés par (Dobson and Ulaby, 1981; Hallikainen et al., 1985). La permittivité diélectrique du sol est décomposée en une partie réelle et une partie imaginaire, elle a pour expression : $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$. Hallikainen et al., 1985 montrent ainsi que les composantes réelle et imaginaire peuvent être approximées par des polynômes du second degré, qui varient avec les fractions de sable et d'argile, et la fréquence de l'OEM considérée (Figure 45).

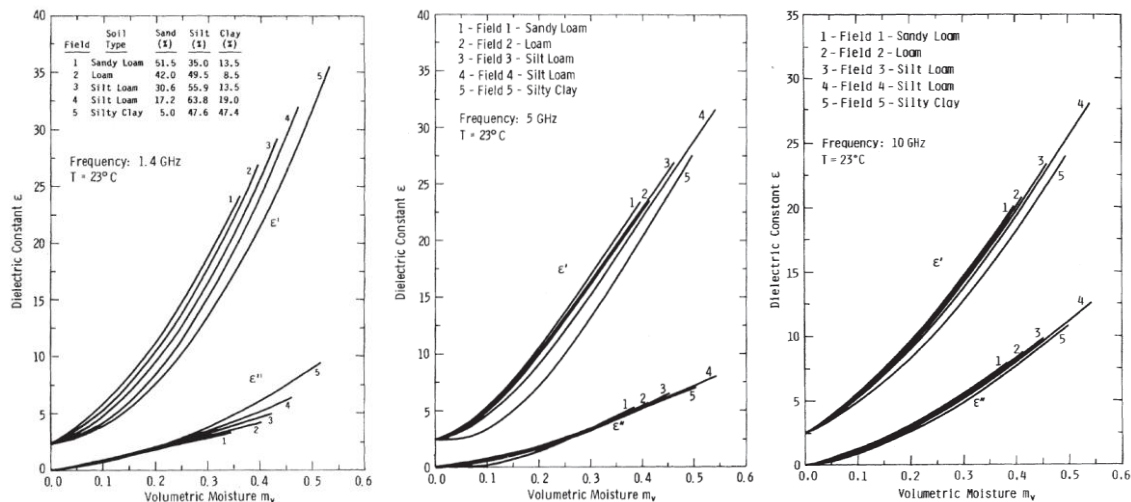


Figure 45 : Relations entre la permittivité diélectrique et le contenu en eau pour 5 types de sol, à des fréquences de 1,4 GHz, 5 GHz, et 10 GHz (Hallikainen et al., 1985).

Dans chacun des cas, la permittivité diélectrique augmente avec l'humidité, les valeurs réelles étant supérieures à la celles imaginaires. A une fréquence donnée, la partie imaginaire ne présente que peu de différences, quel que soit le sol considéré (excepté à 1,4 GHz pour des humidités supérieures à 30 %).

Concernant la partie réelle, les différences entre les sols sont d'autant plus prononcées que la fréquence est basse. A 10 GHz, seule la parcelle présentant de faibles teneurs en sable se distingue des autres. Cette différence est plus prononcée à 5 GHz sur l'ensemble de la gamme d'humidité. La distinction entre les cinq types de sol est maximale à 1,4 GHz.

En bande L, les valeurs maximales de permittivité diélectrique sont associées aux sols présentant les plus fortes teneurs en sable. Pour des humidités de 30 %, les valeurs de la partie réelle varient entre 20 et 14, pour les sols présentant entre 50 et 5 % de sable.

Cette dépendance de la permittivité diélectrique à la texture de surface, est prise en compte dans les modèles d'Oh1992, Dubois et Fung (Chapitre III).

4.3.1. Protocole de mesure

Les mesures de texture de surface sont réalisées en deux étapes. Les échantillons sont tout d'abord prélevés le long des transects servant également à la collecte de l'humidité de surface (Figure 12). Ces prélèvements sont par la suite soumis à différentes analyses en laboratoire (analyses réalisées par le laboratoire : Lara Europe Analyses situé à Toulouse, France).

Collecte des échantillons

Le mode de prélèvement mis en œuvre est illustré sur la Figure 46. Chacun des « points » de mesure est constitué de 16 prélèvements (ou carottages) à l'intérieur d'un cercle de 15 m de diamètre, et sur une profondeur comprise entre 25 à 30 cm.

Au final, 146 mesures ont été effectuées sur l'ensemble des 37 parcelles, réparties entre 2 et 8 points par transect. Le nombre de « points » réalisés sur chacune des parcelles est fonction, de la longueur du transect, et des analyses des mesures d'humidité de surface. Les parcelles présentant des profils d'humidité particuliers, à savoir une tendance ou différents niveaux de valeurs le long du transect de mesure, ont été volontairement sur-échantillonnées.

Le long de ces mêmes transects, la pierrosité de surface a été visuellement estimée en se basant sur une grille d'estimation.

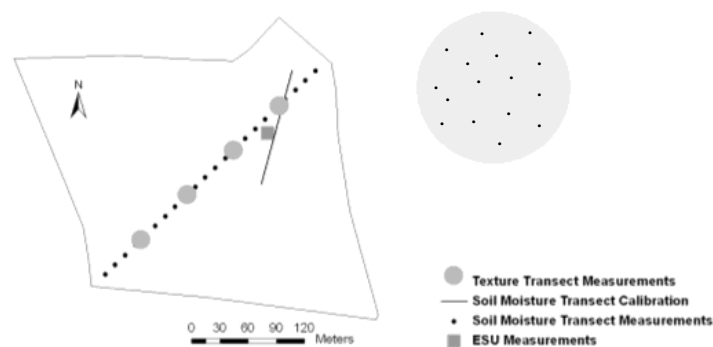


Figure 46 : Technique de prélèvement des échantillons de texture.

Analyse des prélèvements

Le laboratoire « Lara Europe Analyses » a réalisé l'analyse des échantillons. Les fractions d'argiles, de limons fins et grossiers, de sables fins et grossiers, et de refus ont été déterminées en fonction de la taille des éléments (Tableau 3). Sur près de la moitié des prélèvements (71 sur 146), les potentiels de rétention d'eau, à la capacité au champ et au point de flétrissement ont été déterminés. Ils sont dénotés $pF_{2,8}$ et $pF_{4,2}$ et correspondent des pressions de 10^5 Pa et $1,6 \cdot 10^6$ Pa (Calvet, 2003).

Classes	Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier	Refus
Taille des éléments	< 2 μm	2 à 20 μm	20 à 50 μm	50 à 200 μm	200 à 2000 μm	> 2000 μm

Tableau 3 : Répartition de la taille des particules du sol en fonction des classes considérées par le laboratoire « Lara Europe Analyses ».

4.3.2. Analyse des résultats

Les histogrammes (Figure 47) présentent les teneurs en argile, limons (fin et grossier) et sables (fin et grossier) des 146 prélèvements effectués sur les 37 parcelles. Avec des fractions comprises entre 9 et 58% pour l'argile, entre 22 et 77% pour le limon et entre 4 et 53% pour le sable, les teneurs observées couvrent approximativement la moitié de la gamme de chacune des composantes. La texture moyenne est composée de 54% de limon, et de 24% d'argile et de sable, illustrant la dominance de la fraction limoneuse au sein de la zone d'étude. En outre, les histogrammes montrent que 95% des prélèvements ont une teneur en sables inférieure à 40 %. Concernant l'argile, plus de la moitié des points ont une teneur qui n'excède pas les 20%.

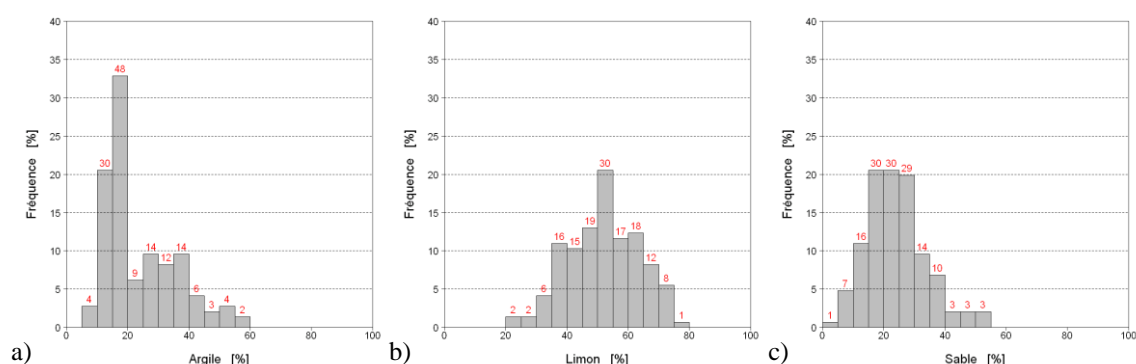


Figure 47 : Histogrammes des fractions d'argile a), de limon b), et de sable c), des 146 prélèvements de texture du sol.

Les éléments dont la taille excède 2000 μm , ou refus, sont présents dans 43 % des prélèvements (63 des 146 relevés). Au maximum, leur fraction atteint 30 % de l'échantillon.

La Figure 48 présente l'estimation visuelle de la pierrosité de surface réalisée le long des transects où sont également collectées les mesures d'humidité de surface (éléments grossiers du sol : cailloux, galets.... Les taux de recouvrement sont très variables. Douze des trente-sept transects échantillonnés présentent des valeurs non nulles (comprises entre 0 et 65%) de pierrosité de surface. Différents cas sont observés, avec par exemple, des

valeurs élevées et constantes le long du transect situés dans la zone A (Figure 48). Les valeurs observées le long des transects de la zone B sont plus basses et variables. Enfin, au sein de la zone C, la pierrosité de surface atteint par endroit 30 %, alors qu'elle est quasi-nulle sur le reste du transect. Dans la majorité des cas, ces zones de pierrosité sont associées à la présence sous-jacente de creps.



Figure 48 : Estimation de la pierrosité de surface le long des transects ayant servi aux mesures de l'humidité de surface.

La Figure 49 représente les fractions d'argile, de limon et de sable obtenues sur l'ensemble des parcelles au sein du triangle USDA (Richer de Forges et al., 2008). Cette classification est scindée en 12 classes de texture, les prélèvements en occupant 7. La classe majoritairement représentée est Silty Loam avec 77 échantillons, puis viennent Loam (20), Silty Clay Loam (16), Clay Loam (15), Clay (10), Silty Clay (5), et Sandy Clay Loam (3). Cette représentation illustre l'hétérogénéité de la texture de surface au sein du site d'étude, les mesures couvrant un tiers de la surface du triangle.

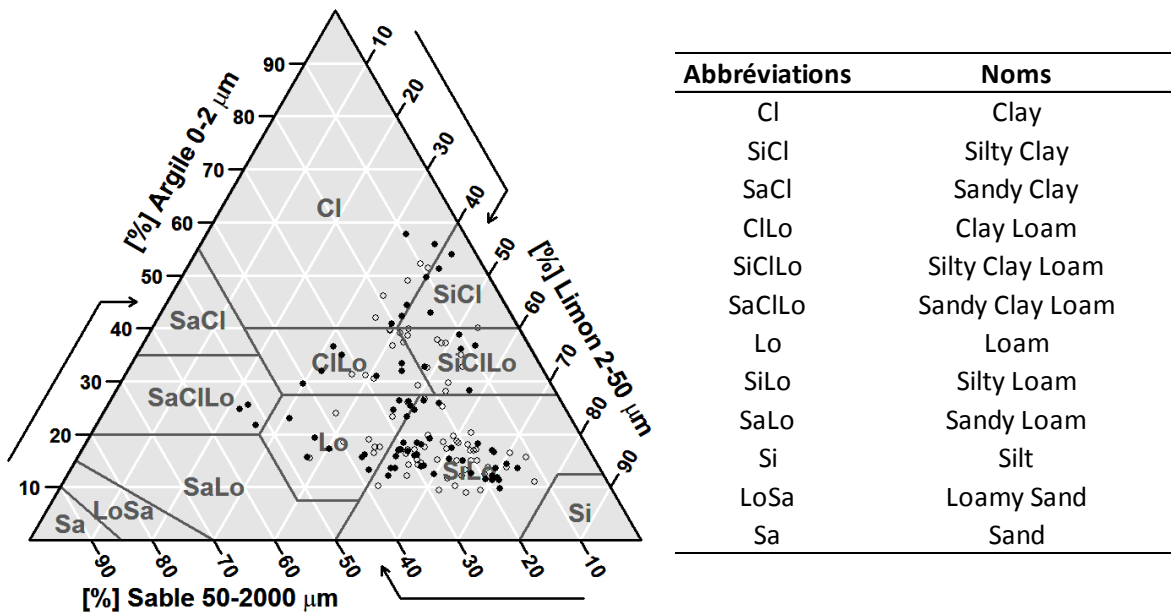


Figure 49 : Projection des mesures de texture de surface sur la classification USDA. Les figurés noir correspondent aux prélèvements où les pF ont été estimés.

Les pF ont été déterminés sur 71 des 146 prélèvements et couvrent l'ensemble de la gamme de variation des textures observées (points en noir sur la Figure 49). Le $pF_{2.8}$ correspondant à la capacité au champ, varie entre 179 et 451 g d'eau par Kg de sol. Le $pF_{4.2}$ correspondant au point de flétrissement, varie entre 82 et 221 g d'eau par Kg de sol.

Ces pF sont analysés en fonction de la composition des différents prélèvements. Ils augmentent de manière linéaire avec la fraction argileuse, selon les relations présentées ci-dessous. La capacité au champ présente une sensibilité à la fraction argileuse deux fois plus importante que le point de flétrissement (coefficients directeur égal à 0,58 contre 0,29). L'intervalle entre ces valeurs définit l'eau disponible pour la végétation. Les sols à forte teneur en argile présentent par conséquent des possibilités de stockage plus importantes. Ces relations sont associées à des coefficients de détermination élevés (supérieurs à 0,96), et à des erreurs relatives faibles (inférieures à 6 %).

$$pF_{2.8} = 0,58 \times ARG + 117$$

Équation 26

$$pF_{4.2} = 0,29 \times ARG + 50$$

Équation 27

Les relations linéaires multiples, mises en place en considérant toutes les composantes du sol (argile, limons, sables et refus), présentent des coefficients de détermination légèrement supérieurs : 0,989 contre 0,973 pour $pF_{2.8}$, et 0,978 contre 0,965 pour $pF_{4.2}$. Elles réduisent également l'erreur associée à l'estimation des pF qui devient inférieure à 5 %.

4.4. Caractérisation de la végétation

Les mesures visant à caractériser la végétation ont été effectuées sur les cinq principales cultures de la région, à savoir : le blé, le colza, le maïs, le soja et le tournesol.

La période d'expérimentation couvre l'intégralité du cycle phénologique des cultures d'été, et la quasi-totalité du cycle des cultures d'hiver. Plusieurs paramètres ont été collectés durant la période comprise entre les mois de février et novembre. Ils peuvent être regroupés en deux catégories, en fonction de leur dynamique temporelle :

- La première catégorie regroupe des paramètres dont les valeurs sont invariantes pendant la saison culturale : type d'occupation du sol, distance inter-rang, orientation des sillons, nombre linéaire de plants. Ils sont collectés une seule fois au cours de la campagne expérimentale.
- La seconde catégorie rassemble les variables en lien avec l'état de la végétation, à savoir : les stades phénologiques, la hauteur, ainsi que le contenu en eau et la biomasse des cultures. Ces paramètres (dynamiques) évoluent au cours du cycle phénologiques, ils sont par conséquent collectés plusieurs fois pour chacune des cultures. Les stades phénologiques et la hauteur des cultures sont collectés lors de chaque sortie. La collecte de la biomasse et du contenu en eau sont mesurés entre quatre et sept fois au cours du développement des cinq cultures suivies.

Des informations concernant les pratiques culturales (dates de semis, de récolte, ...), collectées auprès des exploitants, viennent compléter la base de données.

4.4.1. Sensibilité des signaux SAR à la végétation

Les différents mécanismes de diffusion

Au sein des parcelles agricoles, lorsque la végétation atteint un niveau de développement suffisant, les ondes électromagnétiques interagissent avec le couvert, selon les mécanismes de diffusion représentés sur la Figure 50. Une part du signal est diffusée et renvoyée par les éléments constitutifs de la culture, tels que les feuilles, les branches ou les tiges (diffusion de volume). Le signal peut également atteindre directement le sol et être renvoyé vers le capteur SAR (diffusion de surface), en subissant toutefois une atténuation lorsqu'il traverse la végétation. Le signal peut enfin interagir avec le sol et la végétation, suite à des interactions dites de doubles rebonds. Des interactions multiples (d'ordre 2 ou supérieures) peuvent également intervenir, mais elles ne seront pas considérées par la suite en raison de leur faible contribution dans le signal total rétrodiffusé.

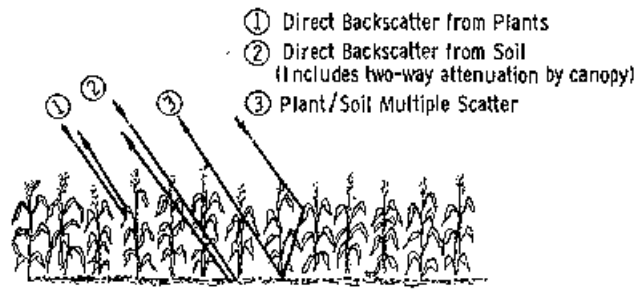


Figure 50 : Principaux mécanismes de diffusion sur un couvert végétal (Ulaby et al., 1984)

La part de chacun de ces mécanismes dans la rétrodiffusion totale du couvert végétal varie en fonction de la configuration des capteurs et des caractéristiques des cultures étudiées.

Effets de la configuration des capteurs sur la rétrodiffusion

Différents travaux ont permis d'appréhender la variation de la sensibilité des données SAR, en fonction des configurations des antennes. Ces études, précises, sont basées sur l'utilisation de capteurs « sol » pointés sur une portion de parcelle agricole. Les antennes utilisées couvrent un large éventail de configurations, en termes de fréquence, d'angle d'incidence, et de polarisation.

Les travaux menés par Ulaby et al., 1979 ou Brown et al., 2003 montrent que la capacité de pénétration du signal radar est liée à la fréquence. Sur des couverts identiques, elle augmente lorsque la fréquence baisse. Les signaux émis en bandes L ou C sont par conséquent, plus à même d'atteindre le sol que ceux émis en bande X.

Sur la Figure 51, les mesures effectuées avec un angle d'incidence de 20° montrent que la sensibilité à l'humidité décroît de manière quasi-linéaire avec la fréquence. A 4,25 GHz, elle est de 0.17 dB par 0.01 g/cm³ d'eau, et passe à 0.04 dB par 0.01 g/cm³ d'eau à 17 GHz.

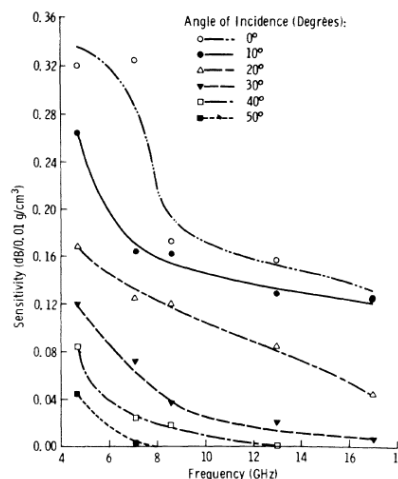


Figure 51 : Sensibilité à l'humidité de surface tracée en fonction de la fréquence à différents angles d'incidence (mesurée sur différents couverts : maïs, soja, alfalfa et milo), d'après Ulaby et al. 1979.

L'effet de l'angle d'incidence sur l'intensité du signal renvoyée, est de la même manière mis en évidence par Ulaby et al., 1975, Ulaby et al., 1979. Les mesures réalisées sur différents couverts établis montrent que la

sensibilité à l'humidité de surface est maximale proche au nadir (Figure 51), qu'elle décroît avec l'augmentation de l'angle d'incidence, et qu'elle devient très faible à des angles de 50° (<0.04 dB par 0.01 g/cm³ d'eau)

Toutefois, malgré une sensibilité moins importante aux angles d'incidence élevés, les coefficients de rétrodiffusion radar sont tout de même séparés de plusieurs dB pour des conditions sèches et humides de sol comme le montre la Figure 52. Dans les travaux d'Ulaby et al., 1979, les mesures sont effectuées à 4,25 GHz, en polarisation HH, pour une gamme d'angle d'incidence compris entre 0 et 60°. L'écart entre les conditions sèches et humides est proche de 3 dB sur le blé. Il est de 6 dB sur le maïs, et atteint 8 dB sur le soja, à 30°. En outre, Brown et al., 2003 montrent que la diminution du signal rétrodiffusé par le sol lorsque l'angle d'incidence augmente, est remplacée par la composante végétation.

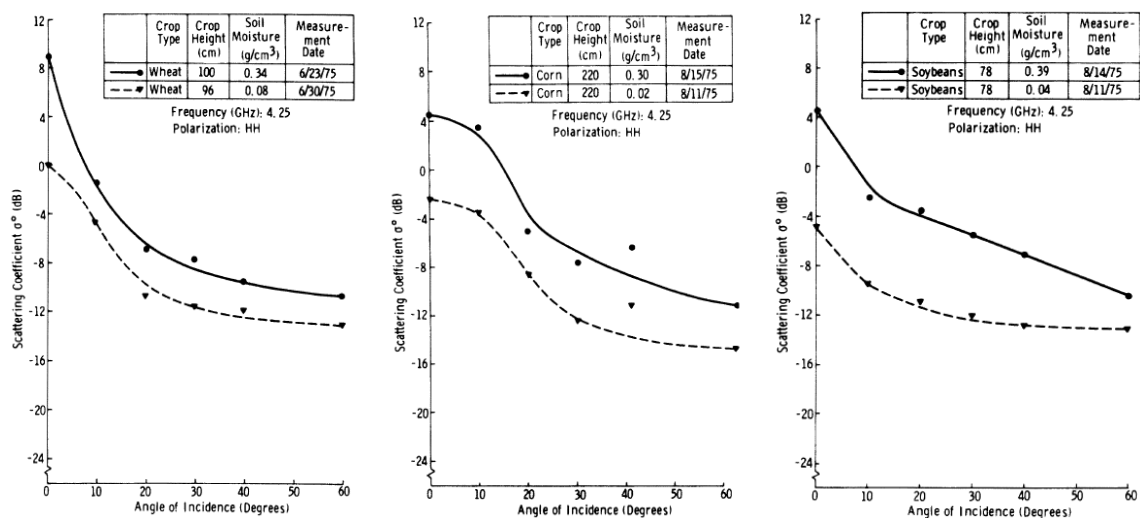


Figure 52 : Réponses angulaires des coefficients de rétrodiffusion acquis à 4,25 GHz en conditions sèche et humide sur des cultures de blé, maïs et soja. (Ulaby et al. 1979)

Sur le blé, cette composante végétation est moins importante pour les mesures effectuées avec la polarisation VV. Les valeurs des coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisation HH restent supérieures, en raison de la plus faible absorbance de cette polarisation par le blé, comme le montrent les travaux de Mattia et al., 2003, Brown et al., 2003. Les polarisations sont différemment impactées par la géométrie des éléments du couvert, les structures telles que les tiges induisant une atténuation plus importante sur la polarisation verticale. Cet écart entre signaux co-polarisés atteint 7 dB (à 23°) sur un le blé, avant le développement de l'épi (Mattia et al., 2003). Cette différence de sensibilité entre les polarisations est souvent exploitée par le biais des ratios entre co-polarisations, ou entre cross- et co-polarisations. Les autres cultures étudiées (maïs, soja...) dans le cadre de cette thèse sont peu renseignées sur leur comportement polarimétrique.

Dynamique temporelle des signaux SAR sur culture

Les études permettant d'apprécier la dynamique temporelle des données SAR sur culture sont basées sur des acquisitions régulières de données au cours du développement de la végétation. Parmi les cultures présentes au sein des zones agricoles, la culture de blé fait partie des espèces les plus étudiées. La signature spectrale du ce couvert a ainsi été caractérisée en bandes L, S, C et X, à l'aide de capteur au sol (Figure 53), aéroportés, ou de données satellites (Bouman and van Kasteren, 1990; Larranaga et al., 2013; Mattia et al., 2003; Mingquan et al., 2012; Moran et al., 2012; Skriver et al., 1999).

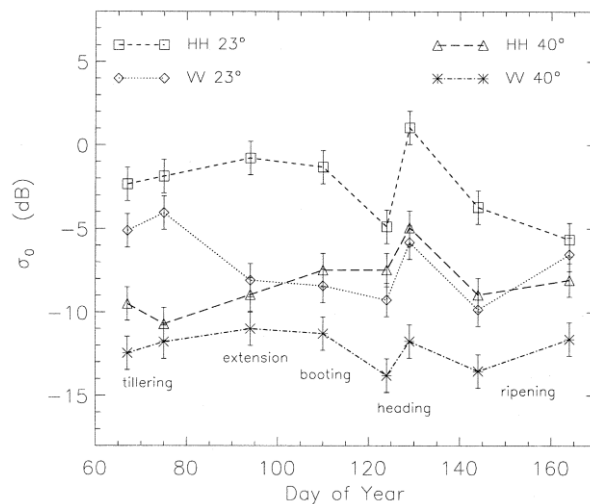


Figure 53 : Evolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C, en polarisation HH et VV, à des angles d'incidence de 23 et 40°, sur une culture de blé. (Mattia et al 2003)

Les mesures présentées par Bouman and van Kasteren, 1990 (bande X, polarisation VV) montrent deux grandes périodes : une diminution des valeurs jusqu'au remplissage des grains, suivie d'une augmentation du signal jusqu'à la récolte, et une dynamique maximale de 8 dB (en considérant les trois angles d'incidence) (Figure 54a). Les profils temporels présentés par Mingquan et al., 2012 (bande X, polarisation HH et VV) sont différents. Les valeurs sont positives durant les premiers stades de développement jusqu'au tallage (Figure 54b). Elles sont quasi-constantes ou augmentent légèrement en fonction des angles, ou des polarisations considérées. Par la suite, elles baissent jusqu'à atteindre des valeurs proches de -8 dB, en co-polarisation.

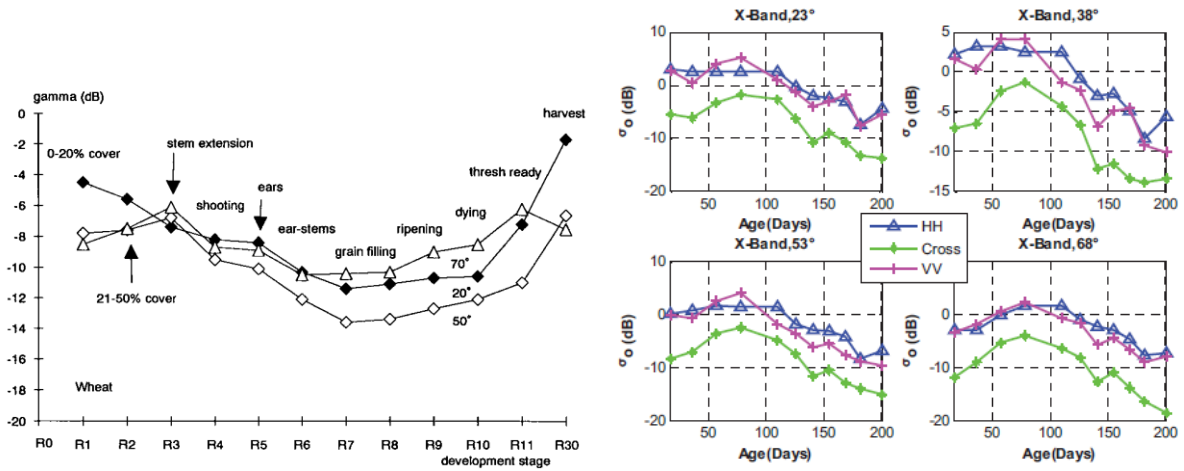


Figure 54 : Evolutions temporelles des signaux radar (gamma en polarisation VV a), et coefficients de rétrodiffusion b)) acquis en bande X, sur une culture de blé, d'après Bouman et al 1992 et Mingquan et al 2012.

Les spécificités des signatures temporelles des couverts agricoles sont souvent utilisées dans des méthodes de classification. Les méthodes mises en œuvre visent à déterminer l'occupation du sol, en se basant sur les informations portées par les images optiques couplées à des images radar acquises en bandes C et L (McNairn et al., 2009a, McNairn et al., 2009b).

Impact de l'orientation des rangs de culture

Les études menées par Ulaby et al., 1979 montrent que l'orientation des rangs vis-à-vis la direction de visée du capteur influence la rétrodiffusion. Les travaux d'Ulaby et al, 1979 portent sur des mesures réalisées sur la gamme de fréquences 1-18 GHz, pour des angles d'incidence compris entre 0 et 60°, et pour les polarisations HH, VV et HV. Ils montrent que les basses fréquences sont sensibles à l'orientation. Ainsi, à 1,1 GHz une différence de 10 dB est observée entre des visées parallèles et perpendiculaires, pour les signaux acquis en co-polarisations (HH ou VV). Cette différence est quasi-nulle à partir de 4 GHz. D'autre part la polarisation croisée n'est pas affectée par la direction de visée.

Dans le cas d'une application à l'échelle d'un paysage (portant sur de nombreuses parcelles, avec des orientations variées), l'impact ce paramètre sur les signaux radar est à prendre à compte. Dans ce contexte, une étude a été menée, en parallèle des travaux de thèse, sur la base de données acquises durant la campagne expérimentale, afin de cartographier l'orientation des rangs de culture à partir d'images Formosat-2 (Marais-Sicre et al., 2014). L'approche multi-temporelle proposée permet la détection de 90% des orientations des rangs de différentes cultures. La mise en œuvre de cette méthode devrait permettre une meilleure spatialisation des analyses présentées dans les Chapitres II et III, où l'étude des signaux radars est réalisée sur différentes parcelles, présentant un contraste limité vis-à-vis de l'orientation.

Protocoles

Les paramètres invariants pendant la saison culturale

Au sein des 350 parcelles servant au suivi qualitatif, les observations en lien avec la végétation concernent la détermination de l'**occupation du sol** (Figure 12). L'**orientation des rangs** des cultures est également collectée, après émergence de la végétation. Le Tableau 4 présente le nombre de parcelles suivies pour chacune des cultures de la région d'étude.

Cultures	Suivi qualitatif	Suivi quantitatif
Blé	120	13
Orge	9	1
Colza	20	4
Maïs	42	8
Soja	2	2
Tournesol	42	6
Chanvre	7	-
Sorgho	6	-
Pois, Fèves	3	-
Prairie	99	3

Tableau 4 : Nombre de parcelles suivies lors de la campagne de mesure.

La **distance inter-rangs** et le **nombre linéaire de plants**, collectés après émergence de la végétation, servent au calcul du nombre de plants par mètre carré. Cette densité sert à la 'spatialisation' des données de biomasse, qui sont alors exprimées en grammes par mètre carré (g.m^{-2}). Ces deux paramètres varient en fonction de la culture considérée, et des pratiques culturales mises en œuvre par chacun des exploitants. Au sein de la zone d'étude, les valeurs de distance inter-rangs sont minimales pour la culture de blé : comprises entre 12 et 17 cm. Elles sont maximales pour la culture de maïs, avec 80 cm. Le nombre linéaire de plants est également très variable, dépendant du nombre de pieds semés par hectare, et du taux de levée. Ce dernier montre de fortes hétérogénéités au niveau du paysage. Les cultures de colza et de tournesol peuvent présenter des cas extrêmes avec des zones totalement dépourvues de végétation.

Les paramètres en lien avec l'état de la végétation

Au sein des 35, le suivi effectué lors de chaque acquisition satellite, a pour objectif d'identifier la végétation en place lors des périodes de culture, et l'état de la surface, lors des phases d'inter-culture. D'autre part, des informations concernant l'**état de la végétation** (levée, floraison, récolte...), les **événements particuliers** (verse sur les céréales, présence d'adventices...), et la **gestion des résidus** (export, broyage...) sont également renseignées.

Un suivi quantitatif est effectué au sein des 37 parcelles. La **hauteur** ainsi que les **stades phénologiques** des cultures sont collectés lors de chaque acquisition satellite radar. La hauteur du couvert est estimée le long des transects (servant à la collecte de l'humidité de surface). Une valeur moyenne est retenue par parcelle lors de chaque sortie. Les 'principaux stades phénologiques' (tels que l'épiaison, la floraison, ou la sénescence...) sont

également déterminés. Des mesures de biomasses sont également effectuées sur une parcelle de chaque type de culture (5 parcelles choisies parmi les 37).

La **distribution verticale de la biomasse** est estimée pour chacune des cultures étudiées. Des mesures de biomasses fraîche et sèche sont effectuées, au cours de la saison de culture. Quatre prélèvements sont réalisés pour le blé, cinq pour le soja, six pour le colza et le maïs, et sept pour le tournesol. Un soin particulier est apporté à la sélection des échantillons. Ils sont choisis au sein d'une zone homogène, et associés à la hauteur moyenne du couvert relevée lors des mesures de hauteur.

Le type d'échantillon prélevé dépend de la culture considérée :

- concernant le blé et de soja, 5 échantillons de 50 cm de longueurs sont prélevés.
- concernant le colza, le maïs et le tournesol, 5 plants sont prélevés (excepté pour les premiers prélèvements suivant la levée des cultures de maïs et de tournesol, la quantité de biomasse étant faible, 5×5 plants ont été prélevés).

Ces échantillons sont segmentés verticalement en strates (Figure 55) : tous les 10 cm pour le blé, le colza, le soja et les premiers stades phénologiques du maïs et du tournesol ; tous les 20 cm lorsque la végétation dépasse 150 cm, concernant le maïs et le tournesol.



Figure 55 :Stratification verticale de la végétation, cas du blé.

La biomasse fraîche de chacune des strates est pesée sur le terrain. Les différents échantillons sont passés à l'étuve (à 65°C) pendant 48h, puis pesés de nouveau afin de déterminer la biomasse sèche. A partir de ces deux composantes sont déduits : le contenu en eau (différence entre la biomasse fraîche et sèche), et l'humidité relative (rapport entre le contenu en eau et la biomasse fraîche). Les différentes composantes de la végétation sont alors exprimées en grammes (g), l'humidité relative en pourcentage (%). 1335 échantillons ont ainsi été effectués.

4.4.2. Analyse des résultats

Evolutions temporelles de la hauteur des cultures

La Figure 56 présente les évolutions temporelles des hauteurs des cinq cultures échantillonnées, ainsi que des illustrations des principaux stades phénologiques décrits par Meier, 2001. Les valeurs moyennes des hauteurs sont encadrées par les valeurs minimales et maximales observées.

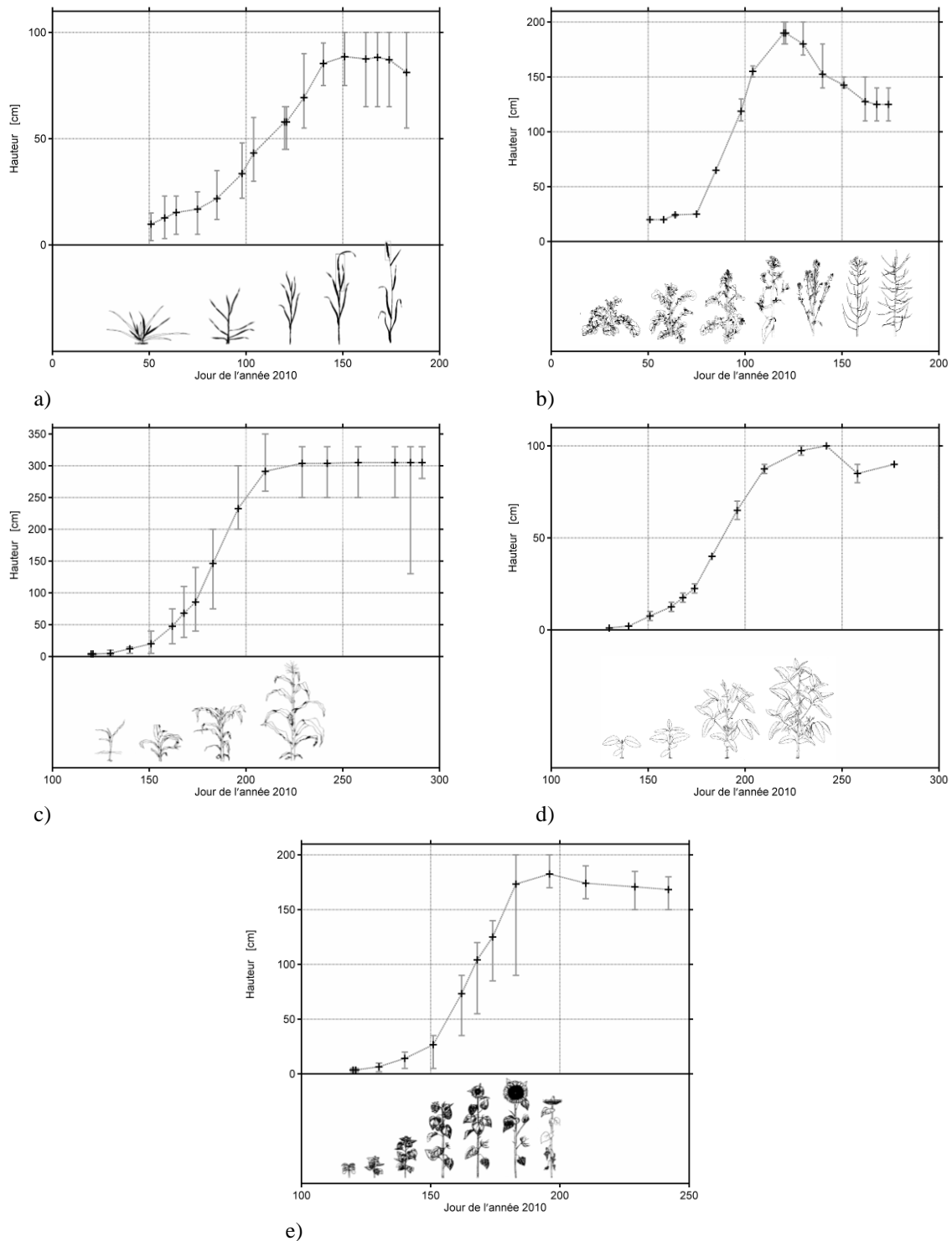


Figure 56 : Evolutions temporelles de la hauteur et des stades phénologiques des cultures de blé a), colza b), maïs c), soja d) et tournesol e). Les valeurs moyennes de hauteur sont bornées par les valeurs minimales et maximales observées.

Trois périodes peuvent être distinguées au cours du développement des différentes cultures.

L'apparition des premiers organes des plantes, sous la forme de rosette de feuilles ou d'une tige et des premières feuilles, s'accompagne d'une faible augmentation de la hauteur. Les stades phénologiques suivant l'émergence sont caractérisés par des valeurs n'excédant pas 25 cm. Concernant les cultures d'hiver, cette période s'étale sur plusieurs mois. Les cultures étant semées en automne et récoltées l'été suivant (l'émergence

de ces cultures n'est pas visible sur la Figure 56). Pour les cultures d'été, cette période dure au maximum un mois, leur croissance étant beaucoup plus rapide.

La végétation se développe ensuite jusqu'à atteindre un maximum, spécifique de la culture considérée. Le blé et le soja présentent alors des valeurs voisines de 100 cm, contrastant avec les 180 cm atteints par le colza et le tournesol, ou les 300 cm du maïs. La croissance des cultures est maximale durant cette période qui voit la mise en place de différentes structures, comme les fleurs ou les inflorescences.

Enfin, durant le développement des fruits et la sénescence, seule la culture de maïs conserve sa valeur maximale de hauteur. Dans le cas du soja, la diminution des valeurs a pour origine la chute des feuilles. Pour les cultures de blé et de tournesol, l'inclinaison de la zone apicale (épis ou capitule) est responsable de la baisse des valeurs. Dans le cas du colza, l'importante diminution de la hauteur (passage de 180 à 130 cm) est causée par l'inclinaison du couvert. Les plants se couchent les uns sur les autres, de proche en proche, par les effets du vent combinés au développement des siliques (poids important des graines).

La hauteur des cultures est associée à une importante variabilité inter-parcellaire, comme en témoignent les valeurs extrêmes bordant la moyenne sur la Figure 56. Les conditions du milieu et les pratiques culturales permettent d'expliquer en partie cette variabilité. Ainsi l'emploi de différents cultivars (plus au moins précoces), combiné à des semis étagés sur un mois engendrent des décalages dans le développement des cultures. D'autre part, les espèces utilisées répondent différemment aux conditions climatiques et édaphologiques.

Evolutions temporelles de la biomasse et du contenu en eau

La Figure 57 présente les évolutions temporelles des biomasses aériennes fraîche, et sèche, et du contenu en eau collectées au cours du cycle phénologique des cultures de blé, colza, maïs, soja et tournesol. Afin de comparer les niveaux atteints par les différentes cultures, les valeurs de biomasse sont exprimées en gramme par mètre carré.

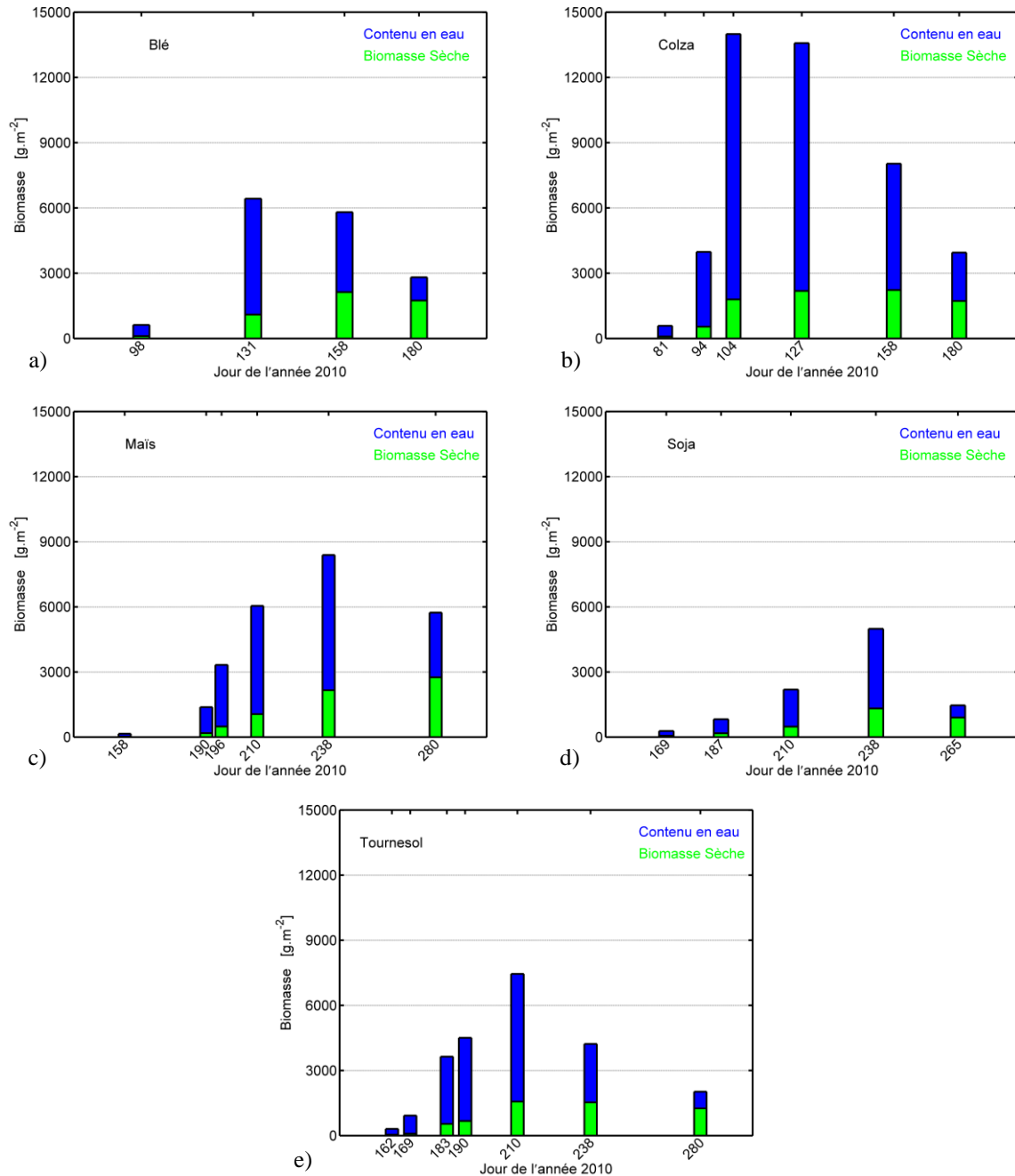


Figure 57 : Evolutions temporelles de la biomasse aérienne des cultures de blé a), colza b), maïs c), soja d) et tournesol e).

Les cultures présentent d'importantes variations de biomasse fraîche. Les profils sont similaires, scindés en deux périodes : une augmentation suivie d'une diminution des valeurs. Les valeurs maximales sont atteintes en milieu de cycle, lors de l'apparition ou du développement des fruits. Toutes cultures confondues, les valeurs maximales de biomasse sont observées sur le colza, où elles atteignent 14000 g.m^{-2} . En comparaison, les valeurs maximales du soja sont trois fois moins importantes. Les valeurs de biomasse fraîche baissent durant la phase de sénescence, suite à la perte progressive d'eau. Cette diminution peut être renforcée par la chute des feuilles dans certains cas. Avant la récolte, avec des valeurs proches de 6000 g.m^{-2} , le maïs présente les valeurs maximales de biomasse fraîche. Elles sont quatre fois plus importantes que celles observées sur la culture de soja.

Les variations de biomasse fraîche sont liées aux fluctuations du contenu en eau des cultures. Ce dernier occupe plus de 80 % de la végétation avant la sénescence. Lors des dernières mesures, les cultures contenaient entre 35 et 55 % d'eau.

Concernant la biomasse sèche, seul le maïs voit ses valeurs augmenter tout au long de son développement. Le maximum est atteint en fin de cycle, avec 2700 g.m^{-2} . Pour les quatre autres cultures, le maximum (compris entre 1300 et 2300 g.m^{-2}) est atteint à la fin de la phase de fructification, avant la chute des feuilles. En fin de cycle, un facteur trois est observé entre les valeurs de biomasse sèche des cultures de soja et de maïs (900 contre 2700 g.m^{-2}). Pour le tournesol, elle est de 1200 g.m^{-2} avant la récolte. Les cultures d'hiver présentent des valeurs comparables, proches des 1700 g.m^{-2} .

Evolutions temporelles de la distribution verticale de la biomasse

La Figure 58 présente l'évolution temporelle de la distribution verticale de la biomasse des cinq cultures étudiées. Pour chaque strate de végétation mesurée, la largeur des figurés est proportionnelle à la quantité de biomasse fraîche. Les valeurs d'humidité relative sont associées à un gradient de couleur (% massique).

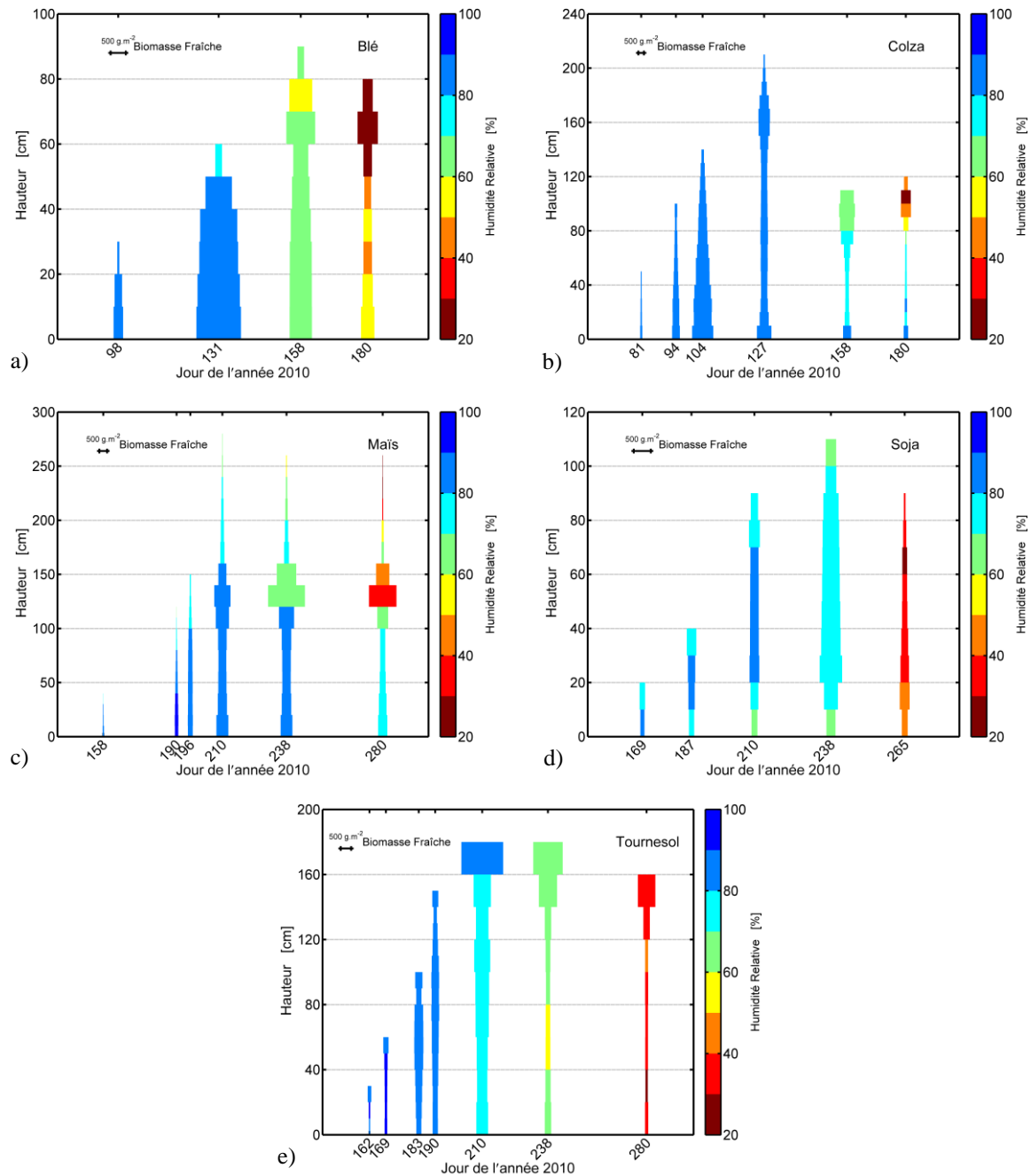


Figure 58 : Evolutions temporelles des distributions verticales de la biomasse fraîche et de l'humidité relative, des cultures de blé a), colza b), maïs c), soja d) et tournesol e).

Durant les premiers stades de développement, jusqu'à l'apparition des fleurs ou inflorescences, les couverts ont en commun de fortes teneurs en eau. L'humidité relative est alors supérieure à 80%, sur l'ensemble de la végétation. Seul le soja présente des valeurs inférieures proches de 70%, pour les strates situées à l'apex et à la base du couvert.

Les deux premiers prélèvements de blé, ainsi que les trois premiers de colza et de maïs présentent des répartitions comparables. La quantité de biomasse des différentes strates augmente de l'apex au sol, formant des structures pyramidales. Ces cultures présentent toutefois des différences de hauteur et de quantité de biomasse. Avant apparition des organes de multiplication, la plupart des strates de blé et de colza dépassent les 500 g.m⁻².

Dans le cas du soja, la répartition entre les différentes couches est quasi-homogène. Concernant le tournesol, la strate apicale présente les quantités maximales de biomasse, pour les deux premiers prélèvements. Par la suite, la répartition devient plus homogène, les feuilles étant régulièrement réparties le long de la tige centrale (jours 183 et 196).

Lors du développement des fruits, seul le soja présente une répartition de la biomasse quasi-homogène, qui s'explique par la structure de la végétation par nœuds similaires. Les gousses contenant les graines sont régulièrement réparties le long de la tige, à l'aisselle des feuilles. Pour les autres cultures, les phases de floraison et fructification s'accompagnent de profonds changements. D'importants contrastes de répartition de biomasse apparaissent, au profit de la zone apical, dans le cas du blé et du tournesol. Au jour 158, la zone contenant les épis concentre plus d'un tiers de la biomasse de blé. Concernant le tournesol, les capitules accumulent plus de la moitié de la biomasse, au jour 238. Dans le cas du maïs, la zone médiane présente les valeurs les plus importantes, et regroupe plus de 40% de la biomasse au jour 238. La culture de colza présente les changements de structure les plus importants. Lors de la floraison (jour 127), la zone apicale se développe fortement. Les valeurs maximales de biomasse sont observées dans cette zone et à la base du couvert. Le développement des siliques entraîne l'inclinaison des plants de proche en proche. Les quatre strates apicales concentrent alors plus de 60% de la biomasse.

Durant la période de maturation et la sénescence, la distribution verticale de la biomasse évolue peu. Les strates regroupant les grains présentent les valeurs maximales. Avant la récolte, l'humidité relative de la végétation est quasi-homogène, dans le cas du tournesol et du soja. Concernant les trois autres cultures, un gradient apparaît entre les strates apicales et celles proches du sol. La partie apicale, concentrant les grains dans le cas du blé et du colza, présente des valeurs d'humidité relative inférieures à 30%. Dans le cas du maïs, les strates médianes contiennent entre 30 et 40% d'eau. Ces valeurs contrastent avec la partie inférieure qui présente 70% d'humidité relative.

4.5. Bilan de la collecte des mesures terrain

Au cours de la campagne expérimentale, les mesures terrain ont été réalisées au plus proche des acquisitions satellites, en s'appuyant sur deux approches complémentaires : un suivi qualitatif sur 350 parcelles, et un suivi quantitatif sur 37 parcelles.

Le comportement moyen de l'humidité de surface, prenant en compte les mesures effectuées au sein de 37 parcelles agricoles, est en adéquation avec les conditions météorologiques (pluviométrie et évaporation potentielle). Les niveaux d'humidité les plus bas sont généralement rencontrés pendant l'été, alors que les pluies sont minimales et l' ET_0 maximale. L'hiver est propice aux fortes valeurs d'humidité (pluies davantage marquée et diminution de l' ET_0).

A l'échelle des 37 parcelles, la variabilité de l'humidité du sol est davantage marquée en été en raison des différentes pratiques culturales et des conditions pédologiques variables.

L'analyse des mesures collectées le long de transects montre que dans certains cas particulier, l'humidité de surface évolue de manière marquée au sein d'une parcelle (irrigation, changement de type de sol, profondeur de sol...). Ces comportements restent cependant rares à l'échelle des 37 parcelles.

La synchronisation des mesures d'humidité de surface avec les acquisitions satellites s'appuie sur un méthode simple de bilan hydrique. Elle est basée sur les mesures d'humidité de surface, et sur un nombre limité de variables météorologiques. La correction prend en compte le décalage temporel entre acquisition satellite et mesure terrain, quelle que soit la chronologie. Pour chacun des capteurs, des différences notables sont observées, pouvant atteindre plusieurs %.

La zone d'étude est caractérisée par des sols à dominance limoneuse, présentant toutefois une importante variabilité d'un point de vue de la texture de surface (texture moyenne composée de 52 % de limon, et 24 % d'argile et de sable). Cette hétérogénéité s'illustre par les intervalles de variation des différentes fractions (ils couvrent 50 % de la gamme possible), et par la présence d'éléments grossiers, observés sur le terrain au sein de 'poches' (témoins de la couche de grep sous-jacente, dans la majorité des cas). La profondeur des sols est également variable, allant de quelques centimètres au sein des zones où la couche de grep est présente, à plusieurs mètres.

Au cours de la saison de culture, les différents couverts sont caractérisés par des dynamiques et des contrastes importants. Pour une même culture, les fortes dynamiques sont, par exemple, illustrées par les variations des différents paramètres (hauteur, biomasses fraîche et sèche, contenu en eau). Ces changements sont graduels ou brusques suivant les périodes considérées (en lien avec les conditions météorologiques et les spécificités des espèces). Un couvert présente ainsi de fortes modifications, comme en témoigne la répartition des différentes composantes de la biomasse, en lien étroit avec les structures associées aux stades phénologiques.

Ces contrastes sont renforcés au niveau du paysage :

- par la culture de différentes espèces d'hiver et d'été,
- par l'emploi de différents cultivars pour une même culture, qui vont répondre différemment aux conditions météorologiques (espèces précoces et tardives).

- par la variabilité des conditions de culture (combinaison des conditions environnementales et des pratiques culturales).

5. CONCLUSION

La campagne expérimentale *MCM'10*, est une base de travail unique au monde pour l'étude des agrosystèmes par télédétection multi-capteurs et multi-spectraux.

Les cultures étudiées sont scindées en deux groupes selon leur période de croissance : cultures d'hiver et d'été. Elles sont semées sur une large variété de sols, aux conditions édaphologiques contrastées ($9\% < T_{\text{ARGILE}} < 58\%$, $22\% < T_{\text{LIMON}} < 77\%$, $4\% < T_{\text{SABLE}} < 53\%$, et des profondeurs allant de quelques centimètres à plusieurs mètres). Dans chacun de ces groupes, les cultures connaissent des pratiques culturales propres à la parcelle, et au mode de gestion de l'agriculteur (labour, irrigation, fertilisation, gestion des résidus...).

L'approche satellitaire de la campagne expérimentale a nécessité d'établir un plan de programmation tout au long de l'année 2010, en interaction permanente avec différentes agences spatiales (DLR, CSA, JAXA, ESA). Cette approche de travail, bien que nécessaire pour pouvoir effectuer des mesures de terrain synchrones, a fortement compliqué l'organisation quotidienne de la première année de thèse. En effet, il a fallu sans cesse composer avec les caractéristiques des différents instruments (en terme d'emprise, de répétitivité, d'angle de visée...), et avec les annulations liées à des problèmes techniques et à des conflits de programmation. Au final, trois séries temporelles ont été constituées en radar, délivrées par les satellites TerraSAR-X, Radarsat-2 et Alos dans les bandes spectrales X, C et L ; auxquelles sont ajoutées des acquisitions réalisées dans l'optique (Formosat-2, Spot-4/5) et le thermique (Landsat-5/7). Ces dernières étant programmées dans le cadre d'autres projets du laboratoire CESBIO. Avec un total d'une centaine d'images acquises dans les hyperfréquences, la zone commune aux différentes scènes couvre une surface de $10 \times 10 \text{ km}^2$. L'ensemble des images a été calibré et géo-référencé. Les extractions des coefficients de rétrodiffusion sont réalisées à la parcelle, sans filtrage préalable des images (les effets de chatoiement sont atténués en considérant la moyenne d'un grand nombre de pixel par parcelle).

Les protocoles de mesures de terrain ont permis de considérer de manière indépendante les deux éléments clés de la surface : le sol et la culture. En complément des stations météorologiques installées dans le cadre du chantier Sud-Ouest, des mesures qualitatives et quantitatives ont été réalisés au plus proche des acquisitions satellites (un jour de décalage au maximum avec les images radar). Sur environ 350 parcelles, les états de surface (occupation du sol, pratiques culturales, états de la culture...) ont ainsi été visuellement déterminés. Au sein de 37 parcelles, sélectionnées car elles présentaient à la fois les principales cultures (blé, colza, maïs, soja, tournesol) et les types de sol de la zone d'étude, des mesures relatives à la végétation (hauteur, biomasse, contenu en eau) et au sol (humidité, rugosité, texture) ont été réalisées. Une approche originale a été mise en œuvre pour corriger les changements valeurs de rugosité et d'humidité du sol, liés au décalage temporel entre la mesure de terrain et l'acquisition satellite. Une attention particulière a également été portée au fait que l'ensemble des données de terrain soient géo-localisées afin de pouvoir développer par la suite des approches compatibles avec des images acquises à haute résolution spatiale.

Un tel jeu de données dépasse le cadre de la thèse et permet d'envisager aujourd'hui de manière scientifique des approches dites à basse comme à haute résolutions satellitaires. L'analyse de produits basse résolution (SMOS, AMSR-E, ASCAT) est ainsi possible, tout comme le travail à une échelle compatible avec la collecte des mesures sur le terrain, au niveau de la parcelle (objectif de la thèse), voire au sein de la parcelle afin d'appréhender la variabilité intra-parcellaire.

La grande quantité de données collectées sont nécessaires à la fois au développement de nouvelles approches pour l'analyse du paysage, à l'amélioration de l'estimation des paramètres des cultures et au suivi des pratiques culturales.

CHAPITRE II : Suivi des cultures par télédétection radar - Complémentarité avec les images optiques

1. INTRODUCTION

En télédétection satellitaire, la grande majorité des études traitant du suivi des surfaces agricoles sont basées sur des données acquises dans les domaines du visible et du proche infrarouge. Les images acquises dans ces longueurs d'onde servent au calcul de différents indices de végétation, comme par exemple l'indice de végétation par différence normalisée (*NDVI*, Rouse et al., 1974), ou l'indice de végétation triangulaire modifié (*MTVI2*, Haboudane et al., 2004), le premier étant le plus communément utilisé. En l'absence de végétation, il présente des valeurs dépendantes de la composition des sols, comprises entre 0,1 et 0,25 ; et peuvent dépasser les 0,90 sur un couvert végétal très dense à très forte activité photosynthétique. De manière générale, les valeurs de cet indice augmentent pendant la phase de croissance de la plante, pour se stabiliser au bout d'un certain stade phénologique, et enfin diminuer pendant la sénescence. La durée et la dynamique observée lors de ces trois phases sont dépendantes de la culture suivie. L'analyse de ces cycles de *NDVI* a permis de développer de nombreuses approches (empiriques ou physiques) pour le suivi et l'estimation des paramètres biophysiques des cultures, comme l'indice foliaire (ou Leaf Area Index, *LAI*), la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par le couvert (*FAPAR*), la fraction de la surface du sol couverte par la végétation (*Fcover*), la biomasse, ou les stades phénologiques (Baret and Guyot, 1991; Claverie et al., 2012; Claverie et al., 2013; Duchemin et al., 2006; Weiss et al., 2002). Les principales limites de ces méthodes sont liées, aux propriétés des images optiques, quasi-inexploitables dans des conditions de forte nébulosité (excepté si les séries temporelles sont très denses), et à la saturation précoce des indices de végétation, dès les premiers stades phénologiques des cultures. De plus, il est très difficile d'obtenir une information concernant l'architecture du couvert, en s'appuyant sur ces images. Ajouté à la quasi impossibilité de dépointage de la plupart des radiomètres optiques, il est souvent très difficile d'obtenir assez d'images pour contraindre des modèles agro-météorologiques, dans le cas des cultures à cycle court.

Avec l'émergence des satellites opérant dans le domaine des micro-ondes actives depuis le début des années 1990 (ERS-1/2, JERS, Envisat...), de nombreux travaux montrent l'intérêt de ces données hyperfréquences pour le suivi des surfaces continentales, et plus particulièrement des agrosystèmes (Brown et al., 2003b; Cookmartin

et al., 2000; Engdahl et al., 2001; Inoue et al., 2002; Mattia et al., 2003). Le lien entre les coefficients de rétrodiffusion radar et les paramètres biophysiques des cultures a également été exploré avec des études de sensibilité fonctions des paramètres de l'onde électromagnétique émise par le satellite (fréquence, polarisation, angle d'incidence...) (Bach et al., 2012; Baghdadi et al., 2009; Fieuzal et al., 2013; Jiao et al., 2010; Moran et al., 2012).

L'utilisation conjointe des données issues des capteurs optiques et radar est une approche beaucoup plus récente, résultante du développement des missions satellitaires radar et optique depuis le début des années 2000 et plus particulièrement à partir de 2006 avec le lancement d'ALOS, de TerraSAR-X et de Radarsat-2. Des travaux montrent maintenant que l'utilisation conjointe, ou la fusion de ces données apporte une information pertinente pour l'estimation de la production agricole, ainsi que pour le suivi des pratiques agricoles (Dente et al., 2008; Fieuzal et al., 2011; Hadria et al., 2009; Hadria et al., 2010; Liu et al., 2009; Mangiarotti et al., 2008; Shang et al., 2008)

Dans ce contexte, ce chapitre est focalisé sur l'apport des données satellites (optiques et radar) pour le suivi de la végétation agricole, et plus particulièrement pour le suivi des principales cultures saisonnières présentes au sein de la zone d'étude du chantier « Sud-Ouest » (cultures d'hiver et d'été) (Chapitre I, section 4.4). Les cultures d'hiver, représentées par le blé et le colza, sont ainsi régulièrement échantillonnées entre les mois de février (après émergence des cultures) et juillet (période de récolte). Aucune mesure n'a été réalisée entre le semis et l'émergence. Les cultures d'été (maïs, soja et tournesol) sont mieux renseignées avec des mesures étalées entre la période de semis (débutant en avril) et la récolte (allant jusqu'en novembre).

Ce chapitre est divisé en 3 sections. La première propose une méthode de normalisation angulaire des signaux radar nécessaire à toute analyse diachronique (section 2). L'approche est basée sur la complémentarité des images satellites acquises dans les domaines optique et radar, sans recours à des mesures de terrain. L'objectif est de rendre transposable cette approche, sur des sites d'études pas toujours aussi bien renseigné que celui utilisé dans cette thèse. Ce travail est mené pour chaque configuration des capteurs (fréquence, polarisation, angle d'incidence), et l'impact de cette correction sur les signatures temporelles est discuté par type de culture.

Les signatures temporelles des signaux radar, obtenues durant la saison agricole de chaque culture, sont présentées dans la section 3. Les dynamiques temporelles sont alors comparées du point de vue de la fréquence, et de la polarisation, avec comme référence, les données acquises dans l'optique. Dans cette section, les analyses des dynamiques sont effectuées à l'échelle mono-parcellaire (choix d'une seule parcelle par type de culture), et pluri-parcellaire (correspondant à l'ensemble des parcelles suivies pour une même culture).

Enfin, la section 4 présente la sensibilité des coefficients de rétrodiffusion à différents paramètres caractérisant les cultures, à savoir la hauteur et l'indice foliaire. La pertinence des différentes configurations satellites est alors discutée en lien avec les performances statistiques des modèles empiriques développés.

Les sections 2 et 4 sont précédées d'un état de l'art dans le domaine associé, afin de mieux situer les apports de ce travail de thèse, vis-à-vis de la bibliographie.

2. NORMALISATION ANGULAIRE DES SIGNAUX SATELLITES RADAR

2.1. Sensibilité des coefficients de rétrodiffusion à l'angle d'incidence

Dans le domaine des micro-ondes, les acquisitions satellites multi-angulaires sont effectuées à des angles d'incidence compris entre $27,3^\circ$ et $53,3^\circ$ en bande X, et entre $24,3^\circ$ et $40,9^\circ$ en bande C. Seules les images en bande L sont acquises à un angle constant de $38,7^\circ$. L'état de l'art suivant permet d'appréhender la sensibilité angulaire des données micro-ondes, afin de prendre en compte ce phénomène dans les futures analyses diachroniques, et pour l'inversion des paramètres biophysiques (à savoir l'indice foliaire et la hauteur).

L'influence de l'angle d'incidence sur la réponse radar est évoquée dans plusieurs études, avec des conditions de surface distinctes, allant du sol nu à recouvrement complet par la végétation. Ces travaux, basés majoritairement sur l'analyse de données radar *in-situ*, ou sur des données issues de capteurs satellitaires, souffrent principalement de la limite du nombre de parcelles échantillonnées. En effet, la plupart des travaux s'intéressent à une seule parcelle « test », ou à une portion de parcelle. Les conditions de surface sont par conséquent relativement « homogènes », et ne renseignent en aucun cas sur la variabilité de comportement observé par imagerie satellitaire. Dans ces études, les données en bande C prédominent (comparées aux bandes X et L), en raison des développements technologiques avancés dans cette bande de fréquence, dans le domaine de la télédétection. Ces travaux décrivent cependant avec précision les sensibilités des coefficients de rétrodiffusion en fonction de conditions de surface spécifiques. En outre, la sensibilité à l'angle d'incidence est en règle générale établie durant des stades de développement précis, rendant très originale l'approche angulaire sur un cycle cultural complet (encadré par le semis et la récolte). Seuls quelques travaux traitent de cette sensibilité durant l'intégralité du développement du couvert, analysant ainsi les effets des importants changements de la végétation.

La sensibilité angulaire des données micro-ondes, sur sol nu et en période de développement des cultures, est considérée dans les deux sous-sections suivantes.

2.1.1. En période de sol nu

Dans ses travaux (Ulaby et al., 1978) présentent des mesures radar *in-situ* effectuées sur des parcelles dépourvues de végétation, à des fréquences de 1,1, 4,25 et 7,25 GHz. La Figure 59 illustre les résultats obtenus en polarisation *HH*, pour des angles d'incidence allant de 0 à 30° , à basse et haute fréquences. Les mesures sont réalisées en conditions sèche et humide, sur des parcelles caractérisées par différents niveaux de rugosité, avec des valeurs de h_{rms} comprises entre 1,1 et 4,1 cm. Les résultats montrent des valeurs de coefficient de rétrodiffusion diminuant avec l'angle d'incidence, quel que soient les fréquences ou les conditions de surface considérées. Cette sensibilité à l'angle d'incidence est minimale pour les surfaces rugueuses (inférieure à 5 dB sur les sols présentant une h_{rms} de 4,1 cm, soit $0,17 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$). A l'inverse, la sensibilité angulaire est d'autant plus prononcée que la fréquence est basse, et que la rugosité est faible. Pour les valeurs minimales de h_{rms} présentées dans cette étude (soit 1,1 cm), une dynamique de 37 dB est observée à 1,1 GHz (soit $1,23 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$), contre 19 dB à

7,25 GHz (soit $0,63 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$), en condition sèche. Enfin, cette sensibilité angulaire est renforcée par le contenu en eau de l'horizon supérieur. En condition humide (avec des valeurs d'humidité de surface comprises entre $0,34$ et $0,40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), la dynamique maximale est de 45 dB à $1,1 \text{ GHz}$ (soit $1,50 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$), et de 24 dB à $7,25 \text{ GHz}$ (soit $0,80 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$).

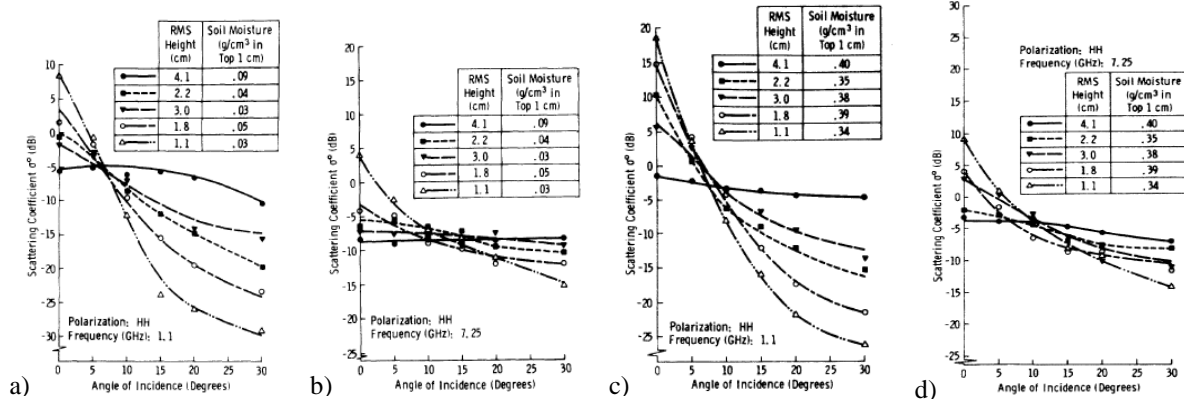


Figure 59 : Réponses angulaires des coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisation *HH*, avec des fréquences de $1,1$ et $7,25 \text{ GHz}$, en conditions sèche (a, b) et humide (c et d). (Ulaby et al., 1978)

Les mesures présentées par (Oh et al., 1992) confirment les observations précédentes (Figure 60). D'autre part, l'analyse de la sensibilité angulaire est étendue sur la gamme 10 - 70° . Les coefficients de rétrodiffusion sont collectés sur différentes conditions de surface (combinant niveaux secs et humides, avec états rugueux et lisses), à des fréquences comprises entre $1,5$ et $9,5 \text{ GHz}$, en polarisations *HH*, *VV* et *HV*. Les résultats présentés sur la Figure 60a montrent que la sensibilité angulaire est maximale entre 10 et 30° , avec plus de 30 dB d'écart (soit $1,5 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$) pour les signaux acquis en co-polarisation, à $1,5 \text{ GHz}$. Cette diminution des valeurs des coefficients de rétrodiffusion est moins prononcée entre 30 et 70° , où elle est proche de 10 dB (soit $0,25 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$). A l'inverse, les mesures présentées sur la Figure 60b, confirment qu'entre 10 et 30° , les coefficients de rétrodiffusion acquis sur une surface rugueuse (h_{rms} de $3,02 \text{ cm}$) ne sont pas affectés par l'angle d'incidence, à $9,5 \text{ GHz}$. Cette sensibilité angulaire apparaît par la suite pour la gamme 30 - 70° , avec 10 dB de différence (soit $0,25 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$). Les résultats montrent d'autre part, que les signaux acquis en co-polarisation (*HH* et *VV*) présentent des comportements et des sensibilités angulaires proches. A l'inverse, les coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisation croisée (*HV*) sont moins affectés par la variation angulaire, 25 dB (soit $0,42 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$) contre 45 dB (soit $0,75 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$) avec la polarisation *HH*, à $1,5 \text{ GHz}$.

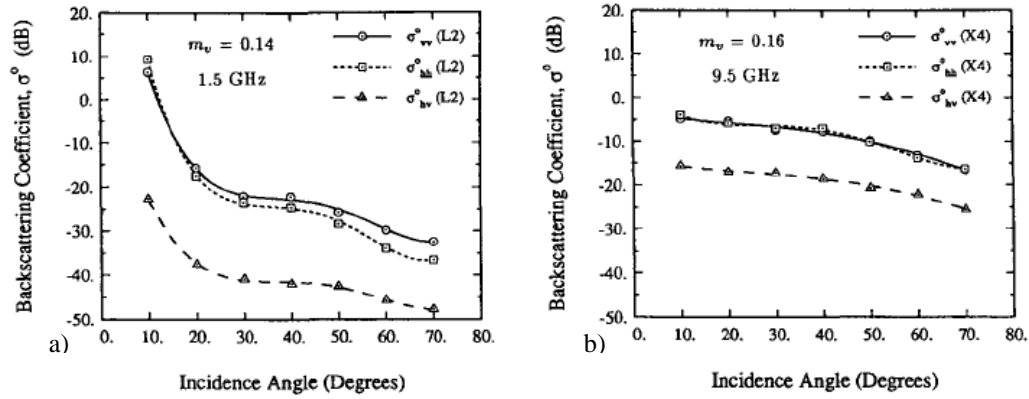


Figure 60 : Réponses angulaires des coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisation HH, VV et HV, à des fréquences de 1,5 GHz, en condition lisse (h_{rms} de 0,32 cm a)), et 9,5 GHz en condition rugueuse (h_{rms} de 3,02 cm b)). (Oh et al., 1992)

2.1.2. En période de végétation

Ulaby et al., 1979 présentent des mesures effectuées sur différents couverts bien établis (à savoir le blé, le soja, le maïs et le sorgho), avec des conditions de surface contrastées concernant l'humidité de surface, à savoir des sols secs et humides. Les mesures radar *in-situ* sont effectuées sur une gamme d'angles d'incidence allant de 0 à 60°, à des fréquences de 1,5 et 4,25 GHz, en polarisation HH. Les résultats montrent d'une part que les coefficients de rétrodiffusion diminuent avec l'angle d'incidence, quel que soit la fréquence, la culture ou les conditions d'humidité de surface (Figure 61). Cette diminution est importante pour les angles compris entre 0 et 20°, elle est comprise entre 6 et 26 dB dans les exemples ci-dessous, soit 0.30 à 1.30 dB. $^{\circ^{-1}}$. Au-delà la diminution est moins prononcée, comprise entre 2 et 8 dB (soit 0.05 et 0.20 dB. $^{\circ^{-1}}$). D'autre part, cette sensibilité à l'angle d'incidence est d'autant plus importante que la fréquence est basse. Elle est plus élevée à 1,5 GHz (où elle supérieure à 22 dB sur la gamme d'angle d'incidence, soit 0,37 dB. $^{\circ^{-1}}$), comparée à celle observée à 4,5 GHz (où elle est au maximum de 18 dB, soit 0,30 dB. $^{\circ^{-1}}$). Elle est également spécifique de la culture considérée, comme le montrent les signatures angulaires associées aux cultures de soja et de blé, ci-dessous.

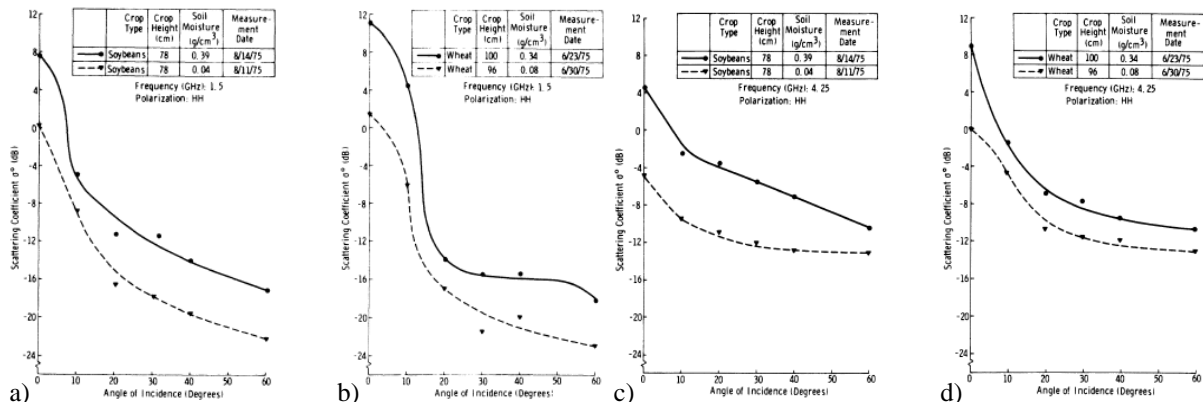


Figure 61 : Réponses angulaires des coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisation HH, avec des fréquences de 1,5 et 4,25 GHz, en conditions sèche et humide, pour des cultures de soja (a et c) et de blé (b et d). (Ulaby et al., 1979)

En outre, les signaux acquis sur des cultures de soja ou de maïs (Figure 62) montrent que l'influence de l'angle d'incidence est dépendante de la polarisation considérée. Dans cette étude, Ulaby (1975) présente des signaux acquis à une fréquence de 5,9 GHz, pour des angles d'incidence compris entre de 0 et 70°. Les réponses

angulaires observées en co-polarisation (HH ou VV) sont assez proches, avec une sensibilité sur l'intervalle d'angle d'incidence, supérieure à 6 dB (soit $0,09 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$). Concernant les signaux acquis en polarisation croisée, l'impact de l'angle d'incidence est moindre, avec une sensibilité inférieure à 4 dB (soit $0,06 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$). Ces résultats sont également confirmés par les approches physiques de modélisation, telles que celles effectuées par (Karam et al., 1992; Picard et al., 2003).

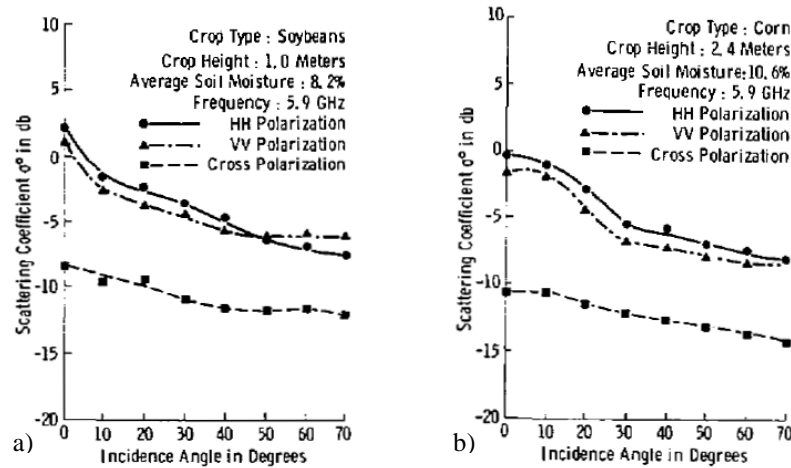


Figure 62 : Réponses angulaires des coefficients de rétrodiffusion acquis à une fréquence de 5,9 GHz, en co- et cross-polarisation, sur des cultures de soja (a) et de maïs (b). (Ulaby, 1975)

Les mesures présentées par (Mattia et al., 2003) en bande C confirment les observations précédentes, avec des mesures de coefficients de rétrodiffusion effectuées durant la saison de culture du blé, à des angles d'incidence compris entre 23 et 60°. Les analyses permettent cependant de mieux renseigner la différence de sensibilité entre les polarisations, pour des stades phénologiques précis (Figure 63). Par exemple, les coefficients de rétrodiffusion acquis avant épiaison en polarisation HH présentent une sensibilité proche de 10 dB (soit $0,27 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$), contre 6 dB (soit $0,16 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$), pour ceux acquis avec la polarisation VV . Cette sensibilité évolue ensuite au cours du développement de la culture, avec une influence de l'angle d'incidence plus prononcée avant l'épiaison, que pour les données acquises pendant la période allant de l'épiaison à la maturation.

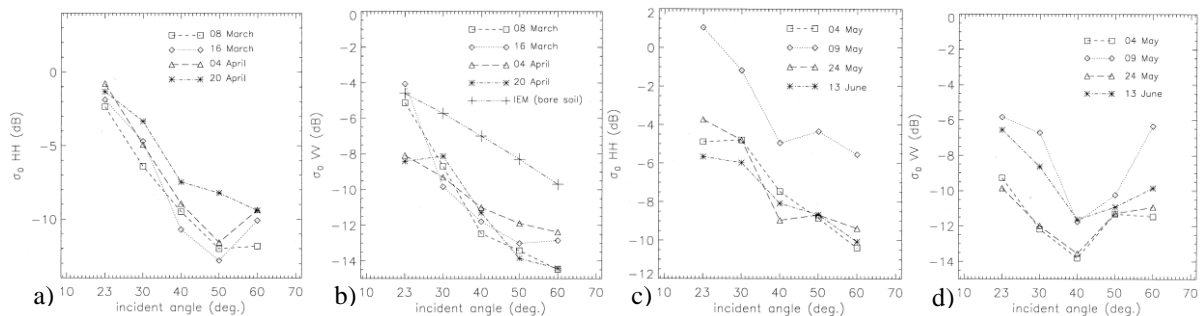


Figure 63 : Réponses angulaires des coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisations HH et VV , à une fréquence de 5,3 GHz, sur une culture de blé : avant (a et b) et après (c et d) épiaison. (Mattia et al., 2003)

Cette évolution de la sensibilité à l'angle d'incidence durant le développement des cultures agricoles est également évoquée dans les travaux de (Balenzano et al., 2011; Skriver et al., 1999) (Figure 64 et Figure 65). Dans ces travaux, les coefficients de rétrodiffusion sont acquis en bandes C et L, avec la polarisation VV , pour des angles d'incidence compris entre 30 et 60°. La sensibilité des signaux rétrodiffusés à l'angle d'incidence est

mesurée au cours du cycle phénologique de différentes cultures (à savoir le blé, le colza, et l'orge). Dans chacune des études, les résultats sont présentés pour deux dates : en phase de croissance de la végétation, puis de sénescence. Les réponses angulaires sont alors contrastées, avec des dynamiques propres au site d'étude considéré et à la fréquence radar.

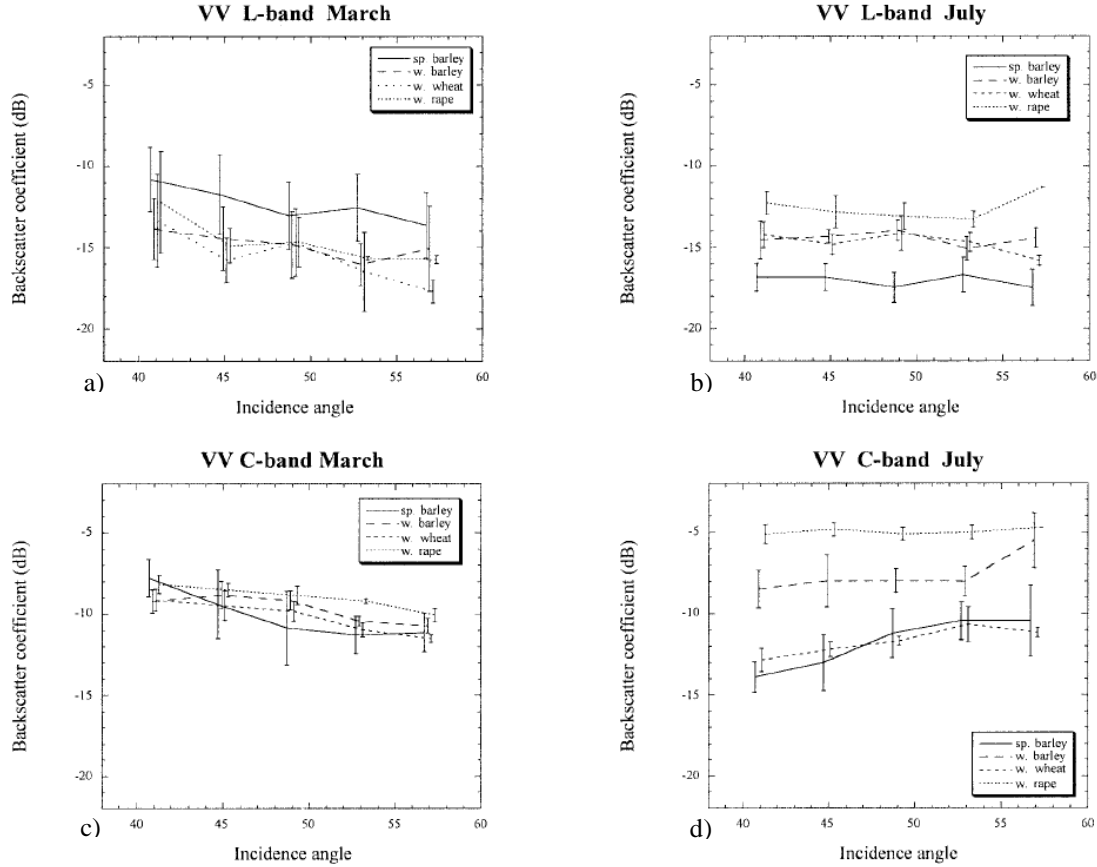


Figure 64 : Coefficients de rétrodiffusion tracés en fonction des angles d'incidence, pour la bande L (le 22 mars a), et le 4 juillet b)) et la bande C (le 24 mars c), et le 4 juillet d)), avec la polarisation VV, sur des cultures de blé, d'orge et de colza. (Skriver et al., 1999)

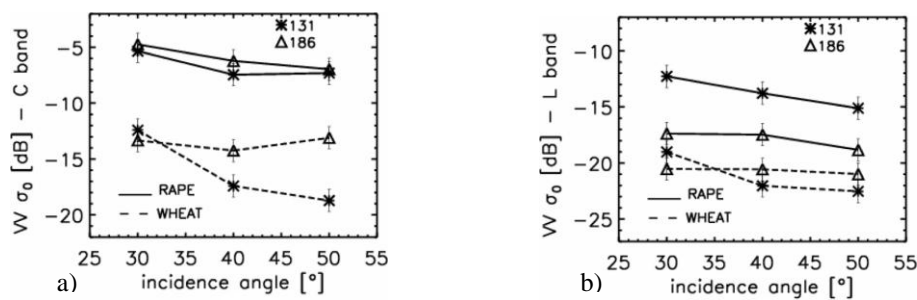


Figure 65 : Coefficients de rétrodiffusion tracés en fonction des angles d'incidence (30°, 40° et 50°), en bandes C (a) et L (b), en polarisation VV, sur des cultures de blé et de colza, aux jours 131 et 186. (Balenzano et al., 2011)

En bande X, les travaux de (Prasad, 2009) présentent des valeurs de rétrodiffusion régulièrement acquises au cours du développement de l'okra (plante tropicale cultivée pour son fruit, consommé comme légume ou condiment). Les mesures sont effectuées à l'aide d'une antenne fonctionnant à 9,89 GHz, délivrant des signaux co-polarisés (*HH* et *VV*). Elles couvrent la gamme d'angle d'incidence allant de 20 à 70°. Les résultats montrent que l'influence de l'angle d'incidence décroît avec le développement de la culture (Figure 66). Trente jours après

le semis, la différence entre les signaux acquis à des incidences contrastées (20 et 70°) est proche de 10 dB (soit 0,20 dB. $^{\circ^{-1}}$). Cette différence n'est plus que de 3 dB (soit 0,06 dB. $^{\circ^{-1}}$), pour les mêmes signaux acquis 90 jours après le semis. D'autre part, les co-polarisations (HH et VV) présentent des évolutions proches, comme en témoignent les graphiques ci-dessous.

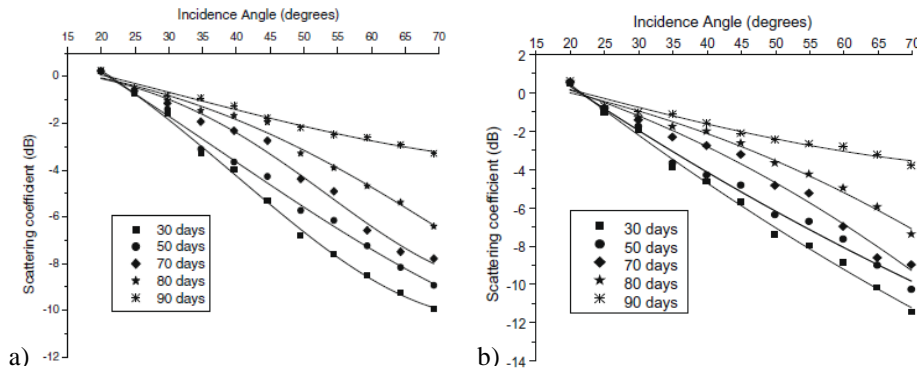


Figure 66 : Réponses angulaires des coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisations HH (a) et VV (b), à une fréquence de 9,89 GHz, lors du développement de la culture d'okra. (Prasad 2009)

Toujours en bande X, les mesures effectuées sur le blé, l'orge et l'avoine par (Bouman and van Kasteren, 1990) montrent une nouvelle fois que les niveaux de rétrodiffusion atteints (gamma dans ce cas), sont fonction de l'angle d'incidence considéré (Figure 67). Elles confirment également que la réponse angulaire évolue avec la succession des stades phénologiques. Enfin, leurs résultats témoignent de la spécificité de la réponse, vis-à-vis de la culture considérée. Concernant les cultures de blé et d'orge (Figure 67a et b), les évolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion sont assez proches, et contrastées par rapport à celles collectées sur l'avoine (Figure 67c).

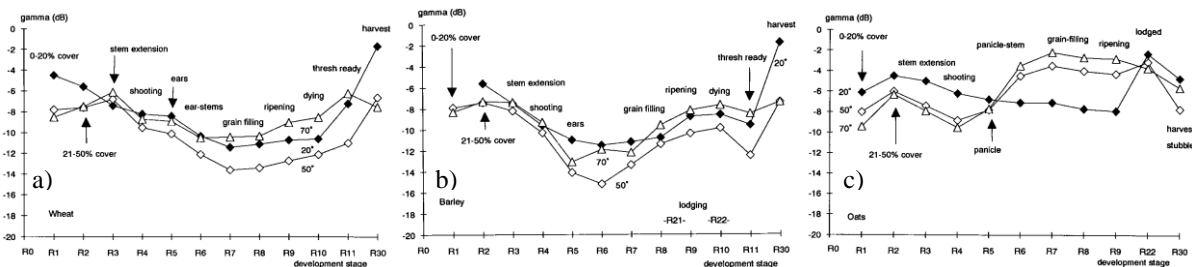


Figure 67 : Signaux rétrodiffusés (gamma, correspondant au rapport des coefficients de rétrodiffusion par le cosinus de l'angle d'incidence, soit $\sigma/\cos\theta$) acquis à 20, 50 et 70°, durant différents stades de développement des cultures de blé a), d'orge b) et d'avoine c), en bande X, avec la polarisation VV. (Bouman et Van Kasteren, 1990)

En résumé, quel que soit l'occupation du sol (période de sol nu, ou de culture), les différents travaux présentés montrent que l'effet de l'angle d'incidence est observable en bandes L, C et X, avec une sensibilité d'autant plus importantes que la fréquence est basse, et que le taux de développement de la culture est faible (influence du stade phénologique). Les signaux acquis en co-polarisation présentent une sensibilité à l'angle d'incidence importante, comparés aux signaux acquis en cross-polarisation, pour lesquels la sensibilité est quasi-nulle en période de végétation.

Dans ce contexte, la méthode proposée pour la normalisation angulaire des coefficients de rétrodiffusion doit être spécifique à la configuration des capteurs (en séparant les différentes fréquences, et les états de polarisation), et des cultures étudiées. De plus, elle doit être applicable durant l'intégralité du cycle phénologique, en rendant compte des changements de la végétation. La méthode mise en œuvre, prenant en compte ces différents impératifs, est présentée dans le paragraphe ci-dessous.

2.2. Méthode de normalisation des coefficients de rétrodiffusion

La normalisation angulaire des coefficients de rétrodiffusion a pour objectif de soustraire l'effet de l'angle d'incidence du signal radar. Affranchis de la dépendance angulaire, les différentes acquisitions peuvent par la suite être analysées d'un point de vue temporel. D'autre part, les coefficients de rétrodiffusion peuvent être comparés selon les critères de fréquence et de polarisation.

La méthode proposée pour la normalisation angulaire est basée sur la mise en place de relations empiriques entre : le *NDVI*, et la différence de coefficients de rétrodiffusion obtenue entre des images acquises à des angles d'incidence très différents (Equation 28). Cette différence de rétrodiffusion est exprimée en décibel par de degrés (ou $\text{dB} \cdot ^\circ^{-1}$). Ces relations sont établies par culture, en séparant les configurations des capteurs, à savoir les fréquences (bandes X et C) et les états de polarisation (*HH*, *VV*, *HV*, *VH*). Les coefficients de rétrodiffusion sont ensuite normalisés afin d'obtenir un signal avec un angle d'incidence de $38,7^\circ$, similaire de celui des images acquises en bande L.

$$\Delta\sigma^\circ = a \times e^{(b \times \text{NDVI})} + c \quad \text{Équation 28}$$

$\Delta\sigma^\circ$ représente la différence entre les coefficients de rétrodiffusion obtenue entre deux images radar successives. Le *NDVI* est dérivé des images optiques. Les lettres *a*, *b* et *c* représentent les coefficients empiriques.

La méthode s'appuie sur les données micro-ondes répondant aux exigences suivantes. Les images sélectionnées doivent être le plus proche possible d'un point de vue temporel. Cette condition vise à minimiser les possibilités de changements des paramètres de surface, et leurs effets sur le signal rétrodiffusé. En outre, les images retenues doivent présenter un écart important vis-à-vis de l'angle d'incidence, afin de maximiser l'effet angulaire.

Dans le cas des images délivrées par TerraSAR-X, les paires d'images retenues présentent une différence d'angle d'incidence de 26° (correspondant à l'écart entre les acquisitions réalisées à $27,3^\circ$ et $53,3^\circ$), et un décalage temporel d'un jour. Pour Radarsat-2, la différence entre les angles d'incidence entre images successives est plus faible. Les couples retenus présentent un écart de 14° au minimum (entre les acquisitions réalisées à 26° et 40°). L'intervalle de temps maximal entre les images conservées est de 13 jours. Dans chacun des cas, une attention particulière est accordée aux différences d'humidité de surface observées entre les acquisitions. Elle est ainsi inférieure 4 % ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) en bande C. Dans le cas des images TerraSAR-X, cette différence est inférieure à 2 % ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).

Le *NDVI* est dérivé des trente images optiques, acquises entre les mois de janvier et décembre, par les satellites Formosat-2, Spot-4/5. Les valeurs de *NDVI* sont interpolées au pas de temps journalier. Cette étape permet de rendre compte de l'état de la végétation au moment des acquisitions micro-ondes. Elle repose sur l'hypothèse suivante : durant de courts intervalles de temps (Δt inférieurs à 11 jours), l'indice de végétation évolue de manière linéaire.

Dans cette étape, les données issues des trois instruments optiques sont fusionnées, la différence entre les valeurs de *NDVI* dérivées des capteurs étant faible. Concernant les images des 9 et 10 avril 2010 (dates où les produits des trois capteurs sont acquis à un jour d'intervalle), les valeurs des coefficients de détermination sont supérieures à 0,99, l'erreur relative est proche de 6%, et le biais est quasi-nul (0,032 au maximum).

2.3. Mise en place de la normalisation angulaire

2.3.1. Approche empirique

La Figure 68 présente les relations établies entre les valeurs de *NDVI* et la sensibilité des coefficients de rétrodiffusion à l'angle d'incidence ($\Delta\sigma^0$), pour chaque culture étudiée (colza, blé, maïs, soja et tournesol), et chaque configuration d'antenne SAR (combinant différentes fréquences et polarisations).

Les différentes relations empiriques montrent d'une part que la sensibilité à l'angle d'incidence est liée aux caractéristiques de l'onde radar (fréquence et polarisation). La sensibilité à l'angle d'incidence est ainsi plus élevée en bande C, comparée à la bande X. Les coefficients acquis en co-polarisation (*HH* ou *VV*, en bande C) présentent une sensibilité plus importante que les signaux acquis en cross-polarisation (*HV* ou *VH*).

La Figure 68 montre également que la sensibilité à l'angle d'incidence est fonction de la culture considérée. En bande X, la sensibilité diminue de manière quasi-linéaire sur les cultures de blé, colza et maïs, lorsque les valeurs de *NDVI* augmentent. Cette diminution est exponentielle dans le cas du soja et du tournesol. Concernant la bande C, les signaux acquis avec les états de polarisation *HH* ou *VV* présentent une décroissance exponentielle, davantage marquée dans le cas du maïs, comparée au blé, ou au tournesol. Elle est linéaire pour le soja. Enfin, seul le colza montre des profils différents entre les signaux acquis en co-polarisation.

De manière générale, les résultats montrent que la sensibilité à l'angle d'incidence est maximale pour les faibles valeurs de *NDVI*, quelles que soient les configurations d'antenne SAR. Ainsi, lorsque l'indice de végétation est voisin de 0,2 (soit caractéristique d'un sol nu), la sensibilité angulaire varie entre 0,1 à 0,45 dB. $^{\circ-1}$, en lien avec les paramètres du sol (à savoir la rugosité). Cet écart diminue avec l'augmentation des valeurs de *NDVI*. Dans la majorité des cas, la sensibilité à l'angle d'incidence sature à des valeurs inférieures à 0,1 dB. $^{\circ-1}$, pour des valeurs de *NDVI* supérieures à 0,4.

Les dynamiques observées, ainsi que la variation de la réponse angulaire avec la croissance des cultures, confirment, et généralisent les observations présentées dans des études antérieures (Balenzano et al., 2011; Skriver et al., 1999).

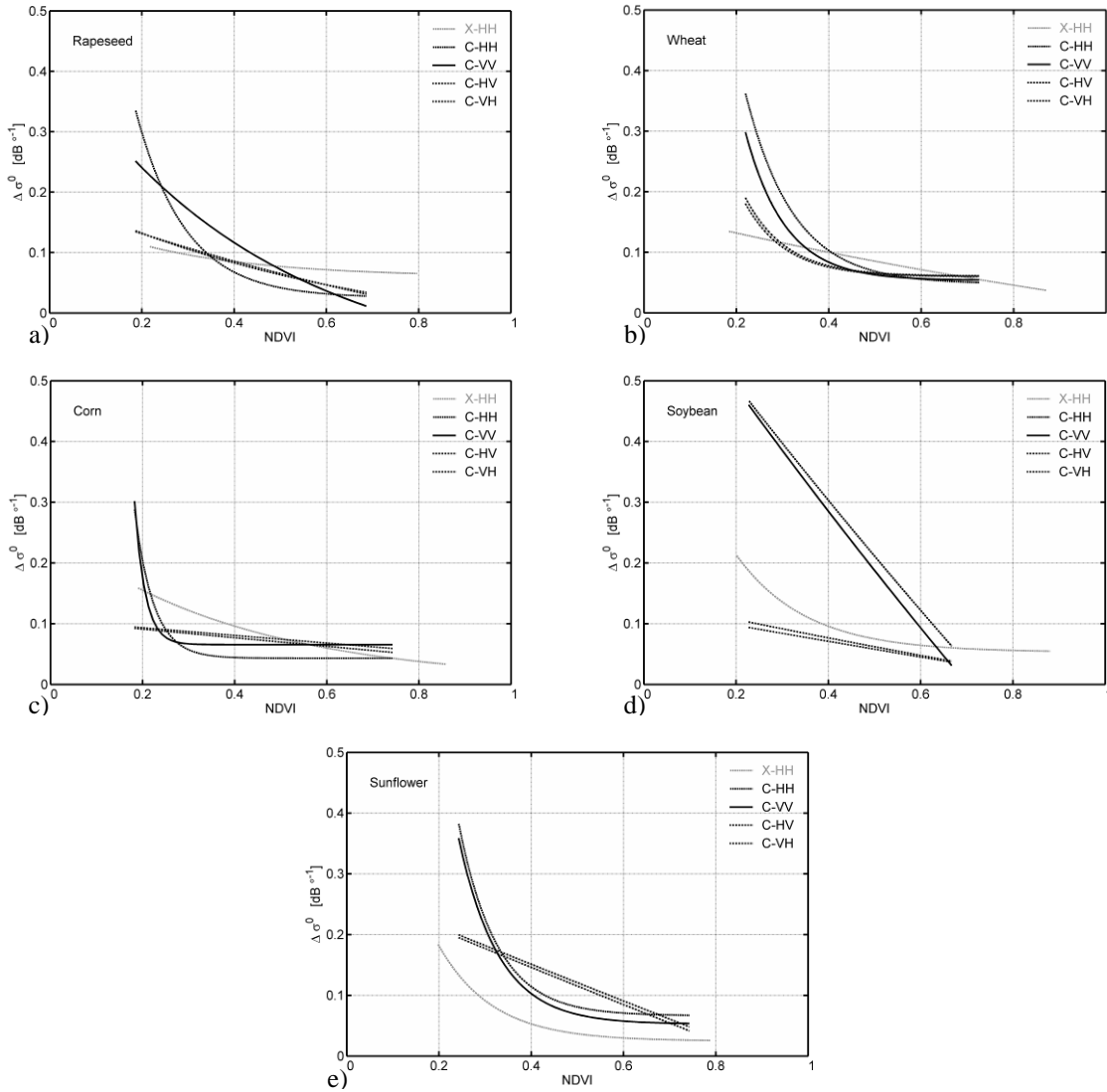


Figure 68 : Relations empiriques entre le NDVI et la différence entre les coefficients de rétrodiffusion ($\Delta\sigma^0$, exprimée en dB par degré, $\text{dB} \cdot ^\circ^{-1}$). Pour chacune des cultures (colza a), blé b), maïs c), soja d) et tournesol e)), les résultats en bande X (avec la polarisation HH) sont présentés en gris. Concernant la bande C, les relations sont présentées en noir avec des figurés relatifs aux différentes polarisations.

Les performances statistiques obtenues sont acceptables, avec des coefficients de détermination majoritairement supérieurs à 0,5, associés à des erreurs relatives inférieures à 30% (Figure 69). Les moins bons résultats s'expliquent par des conditions de culture contrastées dans cette approche pluri-parcellaires (variabilités dans les espacements inter-rang, l'orientation des rangs, ou les états de rugosité...). Dans ce contexte, les relations empiriques établies sur les cultures de colza, de blé, de soja et de tournesol sont satisfaisantes.

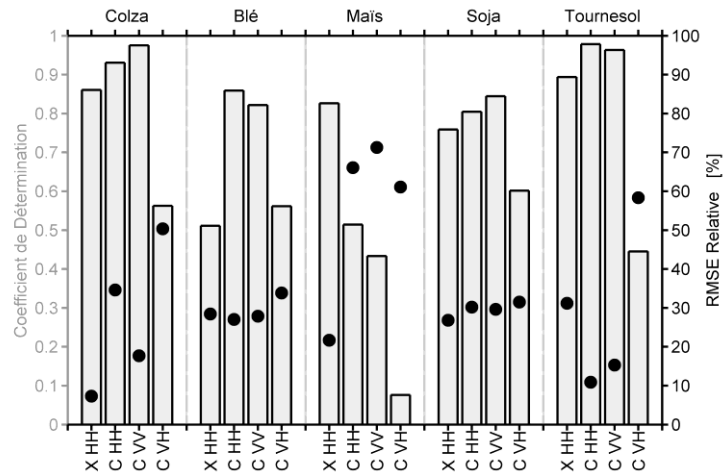


Figure 69 : Valeurs des coefficients de détermination et des erreurs relatives associées aux relations empiriques établies pour la normalisation angulaire des coefficients de rétrodiffusion.

Les valeurs des paramètres empiriques (a , b et c , Equation 28), ainsi que l'ensemble des performances statistiques sont détaillées dans le Tableau 5, pour chaque cas d'étude.

Culture	a	b	c	n	R^2	RMSE [dB. ° ⁻¹]	rRMSE [%]
Freq-Pol							
Colza							
X-HH	0,11	-3,79	0,06	14	0,86	0,006	7
C-HH	1,76	-9,30	0,03	10	0,93	0,030	35
C-VV	0,54	-2,19	-0,11	10	0,98	0,014	18
C-HV	0,38	-0,76	-0,19	10	0,55	0,033	53
C-VH	0,25	-1,54	-0,05	10	0,56	0,032	50
Blé							
X-HH	0,35	-0,54	-0,18	69	0,51	0,027	28
C-HH	2,63	-9,65	0,05	23	0,86	0,035	27
C-VV	3,12	-11,58	0,05	23	0,82	0,030	28
C-HV	1,43	-11,27	0,06	23	0,51	0,032	36
C-VH	1,52	-11,20	0,06	23	0,56	0,031	34
Maïs							
X-HH	0,25	-2,48	0,00	32	0,83	0,020	22
C-HH	21,16	-24,41	0,04	17	0,51	0,075	66
C-VV	724,27	-43,99	0,07	17	0,43	0,080	71
C-HV	6,72	-0,01	-6,61	17	0,07	0,047	56
C-VH	5,20	-0,01	-5,09	17	0,08	0,049	61
Soja							
X-HH	0,60	-6,63	0,05	10	0,76	0,030	27
C-HH	3,98	-0,26	-3,29	5	0,80	0,092	30
C-VV	3,86	-0,29	-3,15	5	0,84	0,085	30
C-HV	1,32	-0,10	-1,19	5	0,60	0,022	31
C-VH	0,66	-0,25	-0,52	5	0,60	0,024	31
Tournesol							
X-HH	0,87	-8,57	0,02	17	0,89	0,018	31
C-HH	5,83	-12,01	0,07	11	0,98	0,018	11
C-VV	4,96	-11,48	0,05	11	0,96	0,023	15
C-HV	4,14	-0,08	-3,86	11	0,44	0,073	62
C-VH	3,66	-0,09	-3,38	11	0,45	0,072	58

Tableau 5 : Valeurs des paramètres (a , b et c) utilisés pour les relations empirique de normalisation angulaire. Chaque culture et chaque cas de configuration d'antenne sont évalués par des paramètres statistiques (erreurs quadratiques moyennes absolue et relative, et coefficients de détermination).

2.3.2. Impacts de la normalisation sur le signal radar

L'impact de la normalisation angulaire sur les coefficients de rétrodiffusion est illustré sur la Figure 70. Elle présente les signaux radar acquis en bandes X et C, avec la polarisation HH , avant et après normalisation. Les différences observées entre les séries temporelles sont maximales pour les acquisitions effectuées avec des angles d'incidence contrastés (forts ou faibles), et lors des premiers et derniers stades phénologiques. Dans ce cas, les valeurs de $NDVI$ sont faibles, avec une végétation soit en phase d'émergence (cas des cultures d'été, après le semis), soit en période de sénescence (avant la récolte des cultures). Les effets de la normalisation sont par ailleurs illustrés par l'écart entre les acquisitions, effectuées à un jour d'intervalle, en bande X. Avant la normalisation angulaire, cet écart est au maximum de 3,37 et 2,25 dB, sur le blé et colza respectivement. Après la normalisation angulaire, cette différence est réduite à 0,70 et 0,16 dB (forte réduction de la dispersion des points).

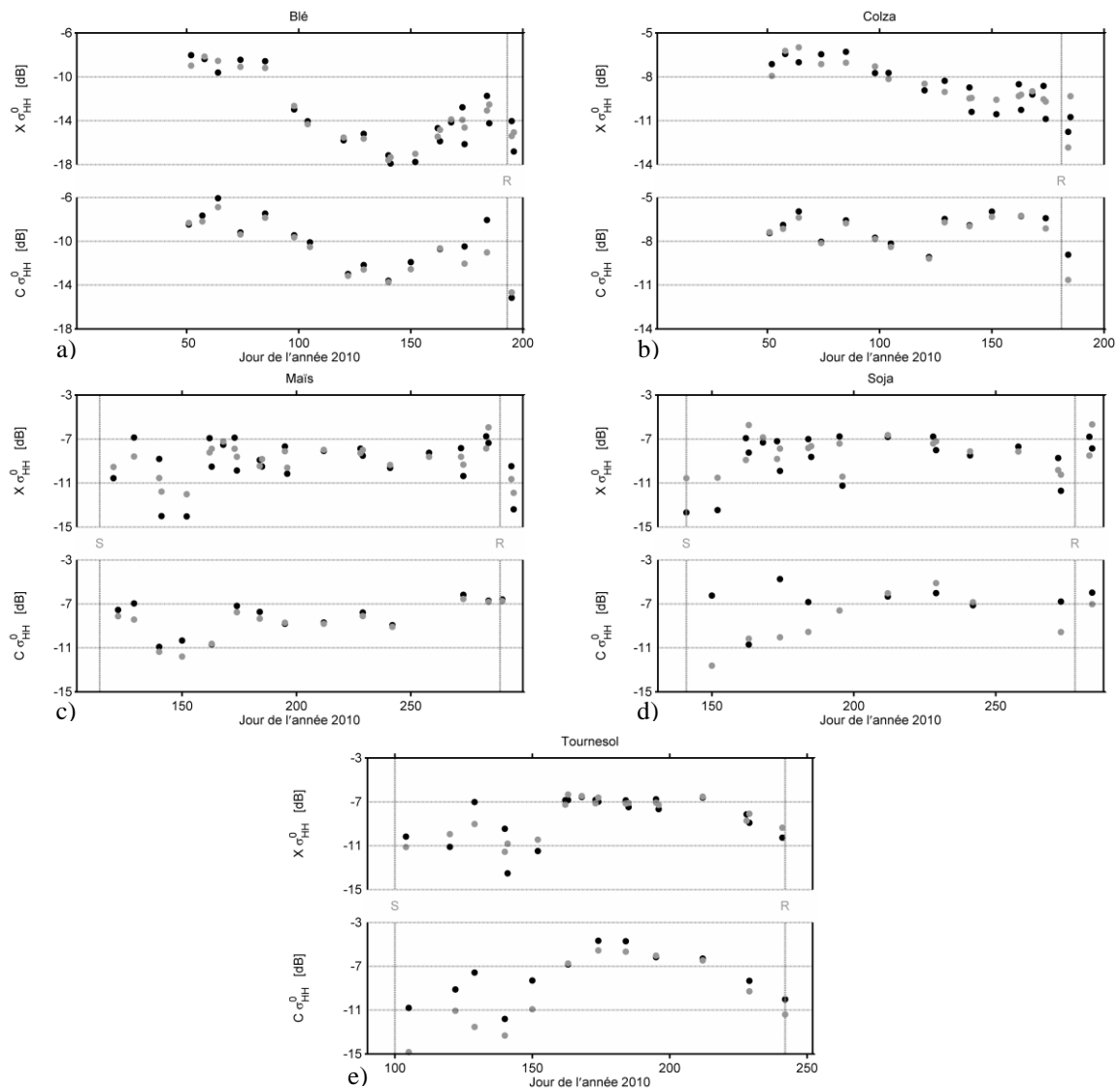


Figure 70 : Evolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes X et C (en polarisation HH), avant (en noir) et après (en gris) normalisation angulaire, pour les cinq cultures suivies (colza a), blé b), maïs c), soja d) et tournesol e)). Les lignes verticales grises et les lettres 'S' et 'R' indiquent les dates de semis et de récolte.

2.4. Bilan de la normalisation angulaire

Cette méthode empirique de normalisation angulaire des coefficients de rétrodiffusion est uniquement basée sur des données issues de la télédétection. Elle est appliquée aux images acquises en bandes X et C, durant l'intégralité de la période de végétation. Les écarts entre faibles et fortes incidences sont par conséquent minimisés, les coefficients de rétrodiffusion étant normalisés à un même angle d'incidence de $38,7^\circ$ (commun avec les données acquises en bande L).

Affranchis de leur dépendance angulaire, les comportements des signaux radar acquis durant la période de culture peuvent être analysés (section 3), et confrontés aux variables décrivant l'état du couvert (section 4).

3. SIGNATURES TEMPORELLES RADAR ET OPTIQUE DES CULTURES

Les analyses diachroniques présentées dans cette section s'appuient sur l'ensemble des données (terrain et image décrites dans le Chapitre I) collectées lors de la période de culture. L'analyse des signatures temporelles est orientée vers l'étude des signaux satellites, et plus particulièrement des données radar. Les configurations des capteurs SAR influençant le niveau de signal rétrodiffusé, les comparaisons temporelles sont tout d'abord réalisées vis-à-vis de la fréquence, à polarisation constante (*HH*), puis en fonction de la polarisation, en bande C.

3.1. Apports des différentes fréquences

3.1.1. Suivi des cultures pluviales d'hiver (colza et blé)

Au sein de la zone d'étude, les cultures pluviales d'hiver sont majoritairement représentées par le colza et le blé. Leurs saisons de culture, bornées par les dates de semis et de récolte, s'étalent sur la période comprise entre les mois de septembre et de juillet de l'année suivante.

Les photographies, présentées ci-dessous (Figure 71 et Figure 72), illustrent l'état de la végétation à différentes périodes : après la période hivernale (a), durant la floraison ou l'épiaison (b), ou la sénescence (c). Après la récolte, les résidus (tels que les tiges, ou les chaumes) couvrent la surface. Les taux de couverture du sol sont dépendants de la culture considérée, et des pratiques mises en œuvre. Les débris de culture couvrent au maximum 90% de la surface dans le cas du colza. Dans le cas du blé, les chaumes peuvent être exportés (pailles pressées sous la forme de bottes ou de balles), ou broyés formant une couche homogène. Les taux de couverture associés varient entre 70%, et des valeurs proches de 100%. Pour chaque culture, les rangs de semis sont clairement identifiables après la récolte (Marais-Sicre et al., 2014), ils sont matérialisés par les portions de tiges verticales (d).



Figure 71 : Illustration de l'évolution de la culture de colza pour différentes périodes : a) premiers stades phénologiques (05/03/2010), b) début de la floraison (08/04/2010), c) sénescence et inclinaison de la végétation (11/06/2010), d) chaumes après récolte (02/07/2010).



Figure 72 : Illustration de l'évolution de la culture de blé pour différentes périodes : a) premiers stades phénologiques (20/02/2010), b) épiaison (20/05/2010), c) végétation sénescence avec des zones de verse (02/07/2010), d) chaumes après récolte (17/08/2010).

Au cours de leur cycle phénologique, ces deux cultures sont soumises à des conditions climatiques proches (du point de vue des températures et des précipitations). Cependant, quelques différences demeurent dans la gestion de la parcelle. Par exemple, en 2010, certains exploitants ont réalisé une irrigation durant la phase de croissance du blé. Afin de minimiser les erreurs d'analyse, les itinéraires techniques ont été collectés auprès des agriculteurs.

Suite au semis, les premiers organes se développent, sous la forme de feuilles étalées dans le cas du blé, ou regroupées en rosettes concernant le colza. Durant cette partie du cycle, la croissance de la végétation est modérée. Les premières formes de végétation sont soumises aux faibles températures hivernales. Après cette période, les stades phénologiques se succèdent plus rapidement. Avec les températures plus élevées, les différents organes des cultures, tels que les tiges, les inflorescences, ou les épis, se mettent en place. Suite à la floraison, les grains se développent et mûrissent. La sénescence est principalement observée durant le mois de juin. Tout au long de la saison agricole, ces deux couverts végétaux présentent de profonds changements, avec des stades phénologiques associés à des architectures contrastées. (Les descriptions sont basées sur les observations réalisées sur le terrain, ainsi que sur les stades phénologiques proposés par Meier, 2001).

Cas du colza

Les premières acquisitions réalisées de manière synchrones en bandes X et C sont effectuées après l'émergence du colza (20 Février 2010, jour 51, Figure 73a). Le sol est alors couvert par une végétation caractérisée par une hauteur de 20 cm, et un NDVI proche de 0,6. Concernant les dernières dates (15 Juillet 2010, jour 196), le colza a été récolté, la surface est caractérisée par un sol nu avec la présence de chaumes (résidus de la culture après la récolte, Figure 71d). La Figure 73 présente les évolutions temporelles des signaux radar acquis en bandes X, C et L (polarisation *HH*) tout au long de cette période.

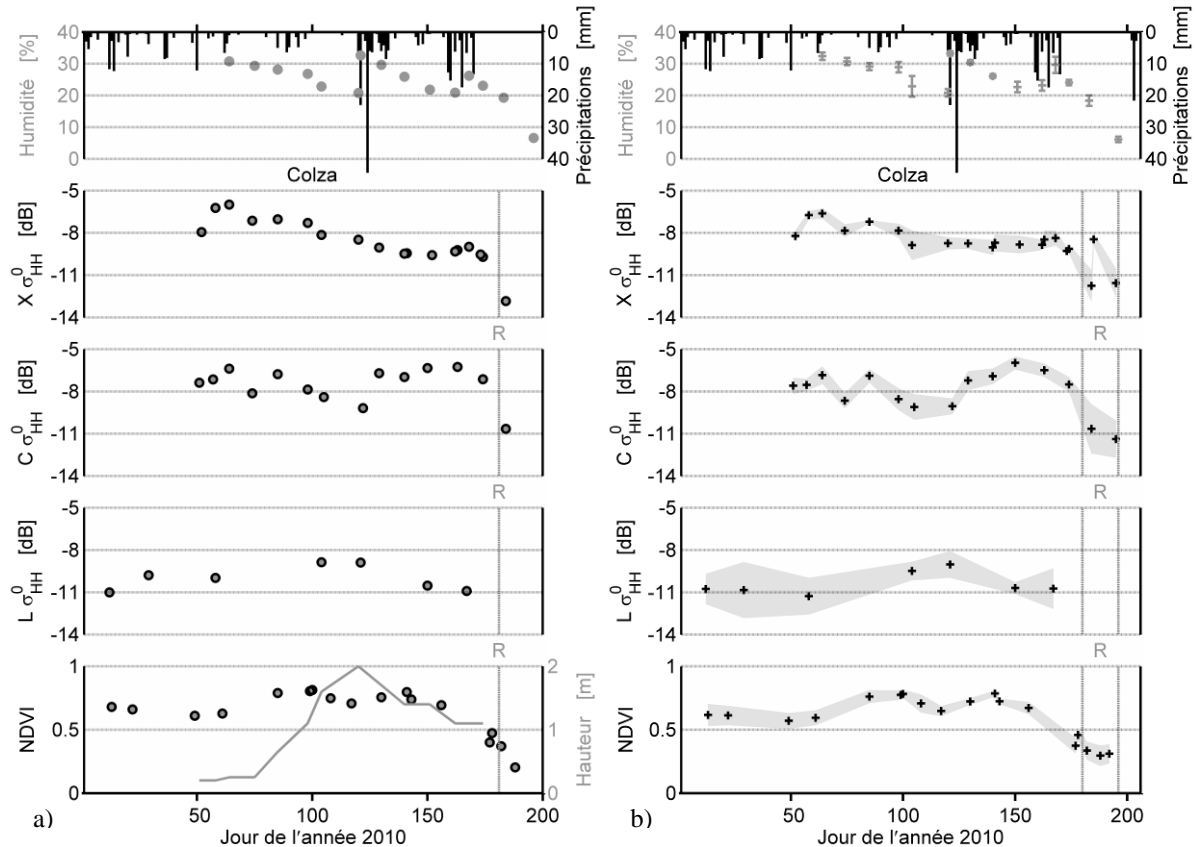


Figure 73 : Evolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes X, C et L, (polarisation HH), pour le colza. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales ainsi que la lettre R indiquent la date (ou période) de récolte.

Au cours de la période de croissance, la bande X présente la dynamique la plus importante, avec une différence entre les valeurs minimales et maximales de l'ordre de 4 dB. Des dynamiques moins importantes sont observées en bandes C et L, avec respectivement 3 et 2 dB. En outre, les évolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion présentent des comportements fortement contrastés aux différentes fréquences (Figure 73a).

En bande X, les valeurs des coefficients de rétrodiffusion sont comprises entre -6 et -10 dB. Les valeurs maximales sont observées pendant les premiers stades phénologiques, les valeurs minimales sont atteintes lors de l'apparition des siliques. Durant la période comprise entre les jours 74 à 140 (correspondant aux stades de floraison et à l'apparition des siliques) le signal décroît linéairement d'environ 3 dB. Le NDVI présente alors des valeurs proches de 0,75, avec une inflexion lors de la floraison du colza. La hauteur du couvert atteint sa valeur maximale, puis diminue à 1,5 m (décroissance causée par l'inclinaison progressive de la végétation). Enfin, concernant l'humidité de surface, les valeurs diminuent de 30 % à 20 %, puis augmentent suite à la pluie du jour 121 (23 mm), sans effet net sur les coefficients de rétrodiffusion. Du jour 140 jusqu'à la récolte (correspondant à la période de maturation des graines), les coefficients de rétrodiffusion saturent autour de -10 dB. Le signal radar n'est pas affecté par la diminution de la hauteur de la culture, la sénescence, ou par les variations d'humidité de surface. La Figure 73b montre que la tendance observée sur une parcelle, est conservée sur les douze parcelles au cours du cycle de phénologique de la culture. En outre, le faible écart type observé en bande X (voisin de 0,5 dB)

témoigne de la stabilité du signal dans le temps et dans l'espace, quel que soit le stade phénologique ou les conditions du sol (au vue de l'humidité principalement, la rugosité n'étant pas fortement modifiée pendant cette période).

En bande C, les valeurs sont comprises entre -6 et -9 dB. Les valeurs maximales sont observées aux jours 150 et 163 ; la minimale au jour 122, lorsque la hauteur de la culture atteint 2 m. Le contenu en eau du colza est alors maximal, avec une humidité relative homogène, comprise entre 80 et 90%. Une diminution linéaire est observée à partir jours 85 à 122 (au cours des stades de floraison et de séchage du sol). Elle est suivie d'une période où les valeurs des coefficients de rétrodiffusion sont élevées, à partir du jour 129 jusqu'à la récolte (lorsque les graines se développent). Ce comportement n'est pas lié aux variations de l'humidité de surface, qui oscillent entre 30 et 20% durant cette période. Durant le développement du colza, les contributions sont tout d'abord dominées par le sol, puis par la végétation avec la mise en place des différents organes (feuilles, branches, inflorescence et gousses) (Cookmartin et al. 2000, Balenzano et al. 2011). Comme dans le cas de la bande X, la Figure 73b montre que la tendance générale est conservée sur les douze parcelles de colza au cours de l'intégralité du cycle de culture. Néanmoins, les écart-types sont légèrement supérieurs à ceux observés en bande X (les valeurs moyennes au cours de la saison agricole sont proches de 0,5 dB en bande X, et de 0,7 dB en bande C), ce qui renforce l'idée que la contribution du sol est un peu plus importante en bande C en présence de végétation (Ulaby et al., 1979). La légère augmentation des écart-types, observée pour les acquisitions réalisées autour du jour 100 (pendant la floraison des cultures), peut être expliquée par une différence de stades phénologiques de cette culture à l'échelle du paysage (décalage de la phase de floraison entre les différentes parcelles).

La récolte de la culture s'accompagne d'une diminution des niveaux de rétrodiffusion. En bandes X et C, la dynamique observée est proche de 4 dB (Figure 73a). Ce comportement est également visible dans l'approche multi-parcelles (Figure 73b), avec toutefois une importante variabilité (liée aux pratiques culturales suivant la récolte, et plus particulièrement à la gestion des résidus de culture).

En bande L, les coefficients de rétrodiffusion montrent une augmentation linéaire au cours de la période de croissance (proche de 2dB), suivie d'une diminution à partir du jour 121, après l'inclinaison de la culture. La valeur maximale de -9 dB est atteinte aux jours 104 et 121, alors que les valeurs d'humidité de surface sont très différentes (23% contre 33%), et la hauteur de la végétation est maximale. Les valeurs minimales de -11 dB sont observées lors des premiers stades de développement (lorsque le sol est couvert par une végétation clairsemée, et l'humidité de surface est élevée), et avant la récolte. Les coefficients de rétrodiffusion sont en phase avec le développement de la culture, en particulier avec l'évolution de la hauteur. Sur les douze parcelles suivies, les valeurs moyennes des coefficients de rétrodiffusion sont associées à des écart-types compris entre 0,4 et 2 dB, qui sont plus élevés que ceux observés en bandes X et C. Les variations sont maximales, lorsque les niveaux de biomasse sont faibles (pour les premières acquisitions satellites), et lorsque la végétation est sèche (pour la dernière acquisition). Elles sont liées aux conditions hétérogènes des sols (humidité et rugosité de surface), particulièrement visibles en bande L (Ulaby et al., 1978). A l'opposé, la dispersion des coefficients de rétrodiffusion diminue lorsque la culture est bien établie.

Cas du blé

Les premières acquisitions radar en bandes X et C (20 Février 2010, jour 51) présentées sur la Figure 74a, sont effectuées après émergence de la culture de blé. A cette date, le sol est encore visible entre les rangs de végétation, sur la parcelle servant au suivi quantitatif. La culture est caractérisée par une hauteur de 15 cm, et un *NDVI* proche de 0,5. Concernant la bande L, les premières acquisitions sont réalisées plus tôt, sur un couvert moins développé (12 et 29 Janvier 2010). Les dernières acquisitions présentées sont effectuées après la récolte (15 Juillet 2010, jour 196). Le sol lisse est alors couvert par des résidus de paille, et des chaumes verticaux (Figure 72d).

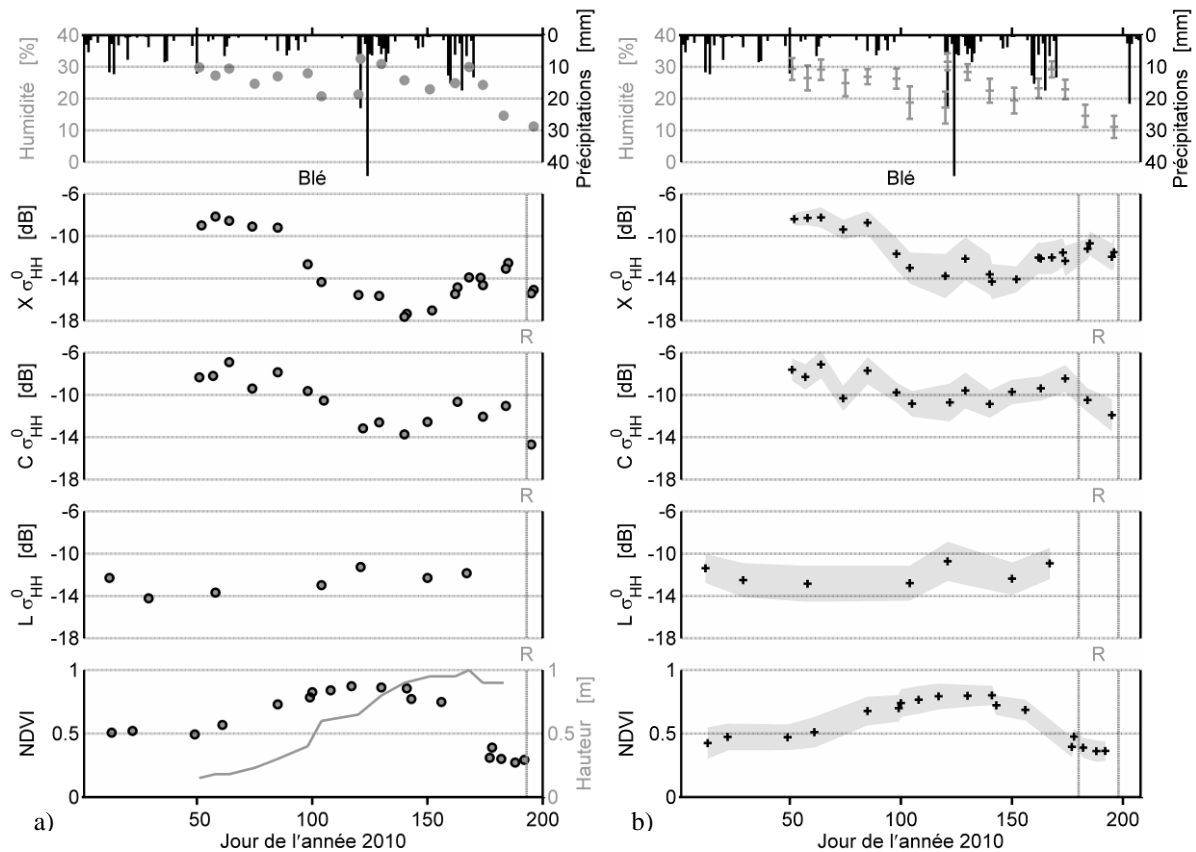


Figure 74 : Evolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes X, C et L, (polarisation HH), pour le blé. Les précipitations, l'humidité du sol, le *NDVI* et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales ainsi que la lettre R indiquent la date (ou période) de récolte.

Les évolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion observées en bandes X et C sont comparables (Figure 74a). L'atténuation du signal est toutefois plus marquée en bande X, avec une dynamique proche des 10 dB, contre 6 dB en bande C. Au cours de la saison de culture, trois périodes associées à des dynamiques contrastées sont observées. De février à mars (des jours 51 à 85), les coefficients de rétrodiffusion montrent peu de variation. Durant cette période, le *NDVI* se rapproche des valeurs maximales, et la hauteur de la végétation augmente légèrement. Par la suite, la période de développement des tiges (comprise entre les jours 85 à 122) est associée à une forte diminution linéaire des valeurs des coefficients de rétrodiffusion, avec une dynamique de

l'ordre de 9 dB en bande X, et 6 dB en bande C. Au début de cette période, le *NDVI* atteint sa valeur maximale ($\sim 0,85$) et sature ; la hauteur de la culture augmente de 0,3 à 0,9 m. Les valeurs maximales d'humidité de surface sont observées au cours de cette période. Elles n'induisent qu'une faible inflexion des coefficients de rétrodiffusion, après l'événement pluvieux le plus élevé du début de l'année 2010 (45 mm). Les travaux de Cookmartin et al. 2000, basés sur un modèle de transfert radiatif, confirment qu'en bande C, les processus de diffusion sont tout d'abord dominés par le sol, avant d'être masqués par les feuilles et les tiges. L'augmentation de coefficients de rétrodiffusion après la pluie de 45 mm est donc principalement associée à l'eau libre déposée sur les tiges et les feuilles. Enfin, à partir du jour 140 et jusqu'à la récolte, les coefficients de rétrodiffusion augmentent d'environ 5 et 3 dB, en bandes X et C, respectivement. Dans le même temps, le *NDVI* diminue, soulignant l'assèchement de la récolte pendant la phase de sénescence. L'humidité relative du couvert est alors inférieure à 40% (au jour 180), avec un gradient marqué entre l'apex et la base du blé (valeurs comprises entre 15 et 60%). Concernant l'humidité de surface, les valeurs avoisinent tout d'abord les 30%, après la période enregistrant plusieurs événements pluvieux. Elles diminuent, et passent sous les 15% avant la récolte, n'impactant quasiment pas le signal radar.

Cette évolution temporelle est confirmée à l'échelle du paysage, sur les soixante-dix parcelles suivies (Figure 74b), malgré la variabilité présentée par les signaux satellites (optique et micro-ondes). Deux phénomènes intéressants sont observés aux bandes X et C. Le premier concerne l'augmentation des valeurs des coefficients de rétrodiffusion, après l'épisode pluvieux du jour 120. Contrairement aux observations faites sur le colza, ce comportement montre que le signal radar est toujours influencé par un changement des conditions d'humidité de surface, même lorsque la végétation est en place (combiné à la contribution de l'eau libre sur la végétation). Le deuxième point concerne la variabilité observée des coefficients de rétrodiffusion, quelle que soit la longueur d'onde considérée. Les valeurs moyennes des écart-types sont proches de 1,3 dB en bandes X et C, et de 0,1 pour le *NDVI*. Cette variabilité est attribuée à des différences de développement de la culture, au sein des soixante-dix parcelles suivies. Les principaux facteurs expliquant cette variabilité sont : les niveaux de biomasse atteints (résultats des pratiques culturales, des différents cultivars et des propriétés hétérogènes des sols), et le décalage entre dates de semis (plus d'un mois entre semis précoce et tardive) conduisant à un écart entre les stades phénologiques. Le plus grand nombre de parcelles suivies est également source de dispersion (en comparaison, « seules » douze parcelles de colza sont échantillonnées).

Comme dans le cas du colza, 3 dB séparent les images acquises avant et après la récolte du blé. Ce comportement est observable dans l'approche mono-parcelle (Figure 74a), il est masqué dans l'approche multi-parcelle, en bande X (Figure 74b).

En bande L, les valeurs des coefficients de rétrodiffusion sont comprises entre -11 dB et -14 dB. La valeur maximale est observée après l'évènement pluvieux du jour 120, elle est associée à la valeur maximale d'humidité de surface (Figure 74a). Les coefficients de rétrodiffusion semblent être moins liés à la hauteur de la culture, que dans le cas du colza. Au sein des soixante-dix parcelles (Figure 74b), les écart-types (variant de 1,4 à 1,9 dB) s'expliquent par les capacités de pénétration plus importantes en bande L. Cette variabilité est associée

aux conditions hétérogènes du sol (combinaison de l'humidité de surface et la rugosité), plus importantes que dans le cas du colza.

3.1.2. Suivi des cultures irriguées d'été (maïs et soja)

Au sein de la zone d'étude, la majeure partie de l'eau destinée à l'irrigation est allouée à la culture de maïs. Cultivée durant la période présentant les températures maximales, cette culture nécessite des apports réguliers d'eau, au cours de son cycle de développement. Moins présent au sein de la zone d'étude, le soja nécessite également des apports d'eau réguliers. Pour ces deux cultures d'été, les semis ont lieu au cours des mois d'avril et de mai, avec l'emploi de différents cultivars. Le soja est récolté en premier, au cours des mois de septembre et d'octobre. Dans le cas du maïs, la récolte des différentes parcelles s'échelonne jusqu'en novembre.

Les clichés, présentés ci-dessous (Figure 75 et Figure 76), ont été réalisés durant la saison agricole. Ils illustrent l'état de la végétation lors de différents stades de développement : lorsque le couvert commence à émerger, suite au semis (a), lorsque la végétation atteint sa hauteur maximale (b), ou durant la sénescence (c, et d dans le cas du soja). Suite à la récolte, les résidus de culture broyés forment une couche homogène à la surface de la plupart des parcelles de maïs (d).

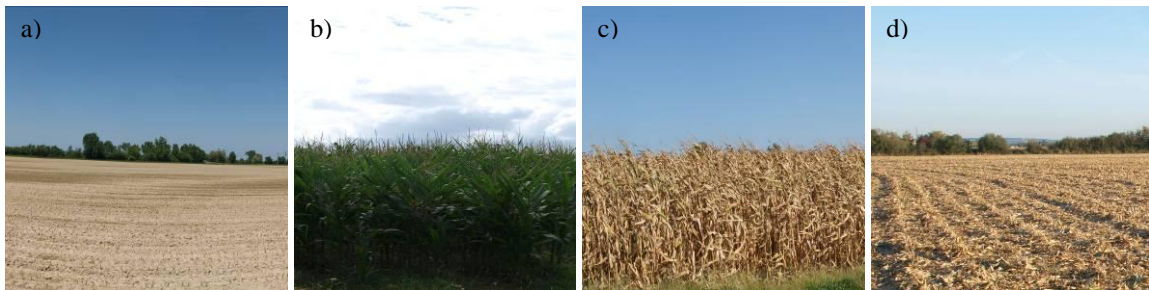


Figure 75 : Illustration de l'évolution de la culture de maïs pour différentes périodes : a) début de la période d'émergence après semis (20/05/2010), b) début de la floraison (29/07/2010), c) sénescence (07/10/2010), d) résidus de culture après récolte (22/10/2010).



Figure 76 : Illustration de l'évolution de la culture de soja pour différentes périodes : a) émergence de la végétation (11/06/2010), b) développement maximal de la végétation (30/08/2010), c) début de sénescence de la végétation (15/09/2010), d) végétation avant la récolte (22/09/2010).

Au cours de leur cycle phénologique, ces deux cultures d'été sont soumises à des températures élevées. L'irrigation permet de compenser les faibles précipitations, et le développement des cultures sans stress hydrique. Au sein de la région, l'eau est dispensée par l'intermédiaire de trois techniques : à l'aide de pivot, d'enrouleur, ou de couverture intégrale. Les quantités d'eau apportées sont voisines des 25 à 30 mm (avec des exceptions en fin de cycle, ou en fonction des particularités de certaines parcelles). Le nombre de tour d'eau est variable, allant de cinq à plus d'une dizaine selon les exploitants suivis.

Suite à l'émergence, le développement de la végétation est rapide. Les feuilles du maïs se mettent en place, puis la tige centrale se développe, suivie de l'inflorescence mâle qui apparaît à l'apex de la plante. Après la

floraison, un épi (voire deux) se développe à l'aisselle d'une feuille, dans la partie médiane des plants. Concernant le soja, après l'apparition des premières feuilles, les plants se développent par nœuds similaires. Les gousses contenant les graines se développent à l'aisselle des feuilles, sur toute la longueur de la tige principale et des pousses latérales. Durant la sénescence les feuilles du soja tombent, seules les tiges et les graines restent en place. (Les descriptions sont basées sur les observations réalisées sur le terrain, ainsi que sur les stades phénologiques proposés par Meier, 2001).

Cas du maïs

Les premières acquisitions radar présentées sur la Figure 77a sont effectuées après le semis du maïs. Les conditions de surface sont alors caractérisées par un sol lisse, dépourvu de végétation (30/04/2010, jour 120). Seuls les rangs de semis apparaissent distinctement (Figure 75a). Le *NDVI* affiche des valeurs minimales, proches de 0,2. Les dernières acquisitions (22/10/2010, jour 295) sont réalisées après récolte de la végétation. Le sol est alors couvert de résidus de culture broyés (mélange de tiges et de feuilles), formant une couche homogène de quelques centimètres (Figure 75d).

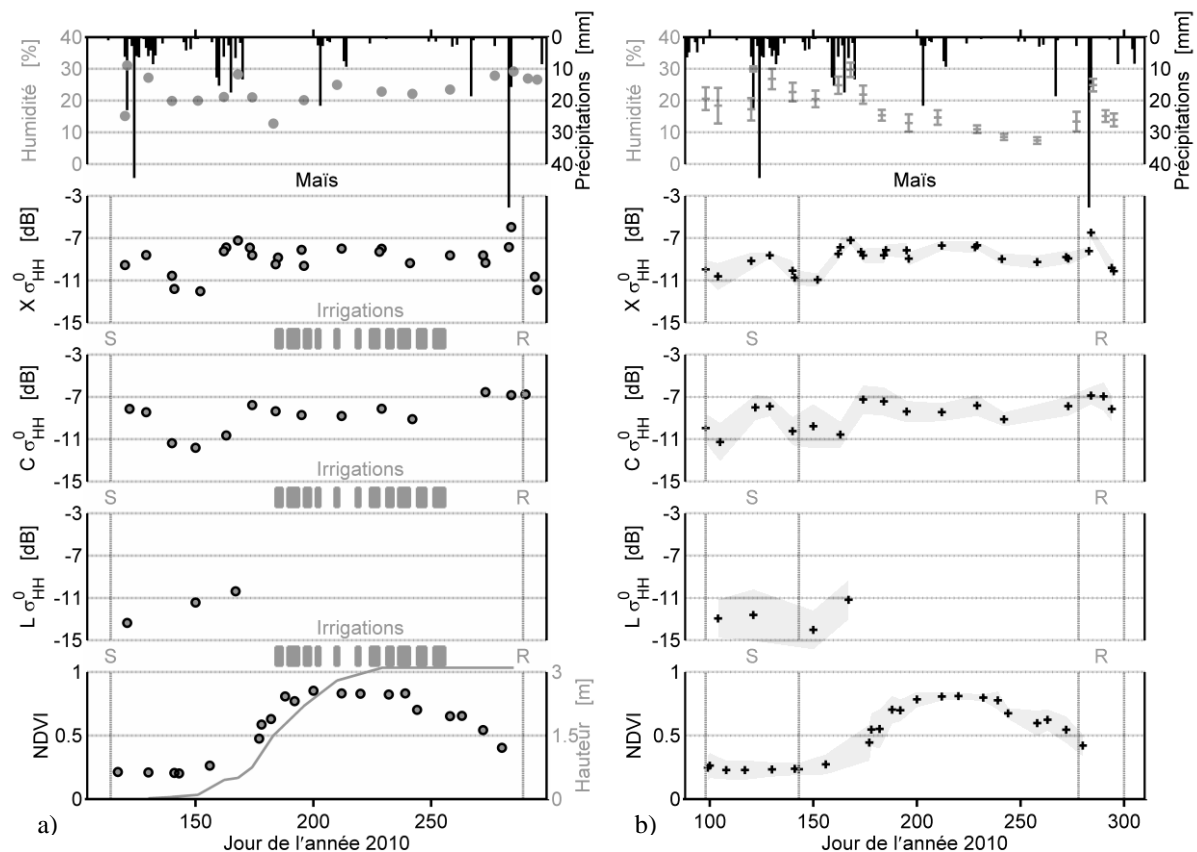


Figure 77 : Evolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes X, C et L, (polarisation HH), pour le maïs. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales et les lettres S et R indiquent les dates (ou périodes) de semis et de récolte.

En bandes X et C, les coefficients de rétrodiffusion présentent des évolutions comparables, et des dynamiques voisines de 5 dB. Les valeurs minimales, proches des -12 dB, sont observées après émergence de la végétation. La hauteur du couvert est alors de 10 cm, et l'humidité de surface voisine de 20%. Les valeurs maximales sont observées sur un couvert sénescant, elles sont supérieures à -7 dB. L'humidité relative est alors proche de 50%, et présente un fort gradient vertical, avec des valeurs comprises entre 0 et 80%. Elles font suite à l'important événement pluvieux (jour 283), l'humidité de surface est alors proche des 30%.

Au cours de la saison de culture, trois périodes distinctes sont observées. Durant l'émergence de la culture (entre les jours 120 et 150), l'évolution des coefficients de rétrodiffusion est en adéquation avec les variations de l'humidité de surface. Les valeurs des coefficients de rétrodiffusion diminuent avec l'assèchement de la surface. Les valeurs de *NDVI* sont stables, malgré l'apparition des premières feuilles. Une augmentation du signal est ensuite observée (entre les jours 150 et 175), avec des valeurs qui passent de -12 à -7 dB. Durant cette période, l'augmentation des valeurs des paramètres en lien avec la végétation illustre les importantes modifications des conditions de surface. Les valeurs de *NDVI* dépassent 0.5, celles de hauteur 1 m. L'humidité de surface augmente également, suite aux différents événements pluvieux. Par la suite, le signal diminue légèrement, puis sature à des valeurs proches de -8 dB. Les variations d'humidité de surface ou l'augmentation de la hauteur n'induisent pas de tendance claire sur les coefficients de rétrodiffusion.

Durant cette même période, la végétation est irriguée à onze reprises, avec des apports d'eau de 25 mm en moyenne. Sur cette parcelle, des séries d'arroseur dispensent l'eau au-dessus de la végétation, par zones successives (irrigation par couverture intégrale). La présence d'eau libre dans le couvert ne s'accompagne d'aucun effet clair sur les coefficients de rétrodiffusion. Les résultats, présentés par (Brown et al., 2003b; Ulaby et al., 1986), montrent pourtant que la présence d'eau dans la végétation est accompagnée d'une augmentation du signal radar. Sur la parcelle étudiée, l'absence d'inflexion peut être expliquée par la méthode d'irrigation. En effet, elle induit une hétérogénéité de la répartition d'eau dans le couvert. La parcelle n'étant pas irriguée dans son intégralité à un instant donné, les signaux moyens extraits à la parcelle ne sont pas affectés par la présence d'eau libre. D'autre part, les conclusions présentées dans les travaux de (Brown et al., 2003b, Ulaby et al., 1986) concernent la culture de blé. Les résultats obtenus sur un couvert ne semblent pas généralisables à l'ensemble des cultures. Cette spécificité montre l'importance de la connaissance de l'occupation des sols.

Durant la sénescence, les valeurs de *NDVI* diminuent de manière régulière, contrairement aux coefficients de rétrodiffusion. Elles sont inférieures à 0,5 avant la récolte. Il semble alors difficile de détecter la récolte quel que soit le signal satellite utilisé (la forte diminution des coefficients de rétrodiffusion en bande X semble davantage liée à l'humidité du sol qu'à la végétation).

Au sein des vingt-huit parcelles, les évolutions des coefficients de rétrodiffusion sont comparables à celles observées sur la parcelle témoin, avec une variabilité plus importante en bande C (1,2 dB en moyenne) comparée à la bande X (0,7 dB). La variabilité maximale en bande X est observée durant la période de semis (1,3 dB), qui s'échelonne sur les mois d'avril et de mai (entre le 08/04/2010 et le 23/05/2010). Le *NDVI* moyen est alors proche de 0,2, témoignant de l'absence de végétation (sol nu), il est associé à des écarts types inférieurs à 0,1. En bande C, la variabilité maximale est observée après la période de semis (avec 2,1 dB), alors que les conditions de surface sont hétérogènes. La végétation a clairement émergé sur certaines parcelles, alors que d'autres présentent un sol nu. Durant cette période, le *NDVI* présente également des valeurs maximales d'écart type (proches de

0,14), qui s'expliquent par le décalage de développement de la végétation, induit les différentes dates de semis. Cette variabilité diminue passé le jour 200, elle est alors inférieure à 0,05 pour le *NDVI*. Sur couvert établi, les coefficients de rétrodiffusion présentent une variabilité moindre, proche de 0,5 et 0,8 dB en bandes X et C, respectivement. Le début de la phase de sénescence est surligné par une légère inflexion des signaux radar, clairement visible sur les vingt-huit parcelles suivies.

En bande L, seuls les premiers stades phénologiques du maïs sont couverts par les acquisitions réalisées entre les mois de mai et de juin. La dynamique des coefficients de rétrodiffusion est néanmoins particulièrement intéressante, avec des valeurs comprises entre -10 et -14 dB. La valeur minimale est observée après le semis. Le sol est alors dépourvu de végétation, et l'humidité de surface affiche des valeurs maximales. Les coefficients de rétrodiffusion augmentent ensuite linéairement, en accord avec l'augmentation de l'humidité du sol, et renforcés par le développement de la culture.

Au sein des vingt-huit parcelles, la variabilité est maximale durant la période de semis, avec des écarts types supérieurs à 2 dB. Cette variabilité diminue suite à l'émergence de la végétation. Elle est proche de 1,8 dB, lorsque les valeurs de *NDVI* présentent une variabilité maximale, en début de développement de la culture de maïs (le sol est alors de plus en plus masqué).

Cas du soja

Les premières acquisitions satellites présentées sur la Figure 78 sont effectuées lors du semis de la culture de soja (21/05/2010, jour 141). La surface est alors dépourvue de végétation, comme en témoigne le *NDVI*, avec des valeurs minimales, proches de 0,2. Les conditions de rugosité sont caractéristiques d'un sol lisse, avec la présence de mottes. Les niveaux de h_{rms} (dans les directions parallèle ou perpendiculaire) sont inférieurs à 2 cm. Les dernières acquisitions micro-ondes (11/10/2010, jour 284), sont réalisées après récolte de la végétation. La surface est couverte d'une fine couche de résidus broyés, laissant apparaître les restes des plans (tiges verticales sur quelques centimètres).

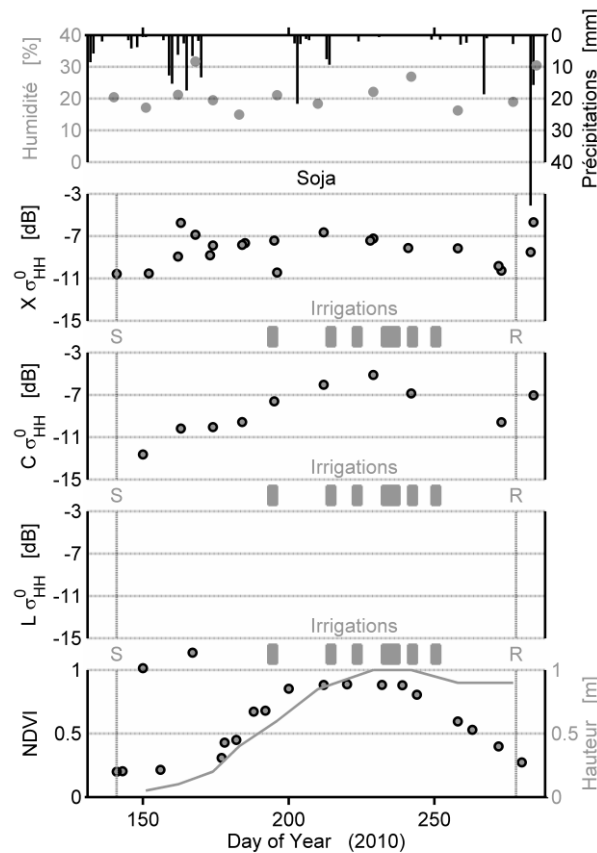


Figure 78 : Evolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes X, C et L, (polarisation HH), pour le soja. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont également présentés. Les lignes verticales et les lettres S et R indiquent les dates de semis et de récolte.

En bandes X et C, les coefficients de rétrodiffusion présentent des évolutions comparables, avec une augmentation des valeurs, suivie d'une diminution. L'importante dynamique observée en bande C (avec 8 dB), est quasi-double de celle en bande X (proche de 5 dB). Quelle que soit la fréquence, les valeurs minimales sont observées lors de la phase d'émergence de la végétation. La végétation ne dépasse pas les 10 cm, laissant apparaître le sol. L'humidité de surface est proche de 20%.

Les valeurs des coefficients de rétrodiffusion augmentent par la suite, jusqu'aux niveaux maximums. En bande X, il est atteint alors que la hauteur de la végétation est de 90 cm (jour 212), et l'humidité relative du couvert est proche de 80%. En bande C, le maximum est atteint plus tardivement au jour 229. Le soja est alors bien établi, et présente une hauteur de 100 cm (Figure 76b). Durant cette même période de développement de la végétation, le *NDVI* augmente rapidement jusqu'à 0,9. Il sature ensuite à partir du jour 200, à l'inverse des signaux radar.

Dans le cas de la bande X, l'augmentation progressive du signal apparaît toutefois « bruitée ». Les acquisitions des jours 163 et 168 présentent des niveaux de rétrodiffusion supérieurs au comportement général. Dans chacun des cas, un évènement pluvieux est enregistré la veille du passage du satellite, entre 16 et 18 heures (l'acquisition de l'image étant effectuée à 6 heures, le lendemain). L'effet de ces précipitations sur le contenu en eau de l'horizon de surface est visible sur les mesures d'humidité de surface associée à l'acquisition du jour 168, la collecte terrain étant réalisée le même jour. Dans le cas de l'acquisition du jour 163, les mesures de l'humidité de surface sont réalisées la veille. Elles sont en accord avec les données des coefficients de rétrodiffusion acquises au jour 162, mais pas avec celles du lendemain. Concernant le niveau de rétrodiffusion associé à l'acquisition du jour 196, aucune observation ne permet d'expliquer la valeur « anormalement » basse.

Durant la sénescence, les valeurs de *NDVI* diminuent de manière régulière. Elles passent de 0,9 à 0,4, concernant l'acquisition avant la récolte. Pendant cette période, la culture jaunit progressivement (Figure 76c), et les feuilles tombent. Avant la récolte, seules les tiges centrales et les gousses restent en place (Figure 76d), l'humidité relative est inférieure à 40% (au jour 265). Dans le cas des coefficients de rétrodiffusion, cette phase est également surlignée par une diminution des valeurs. La dynamique observée en bande X est de 3 dB, elle est proche 5 dB en bande C.

Suite à la récolte, les valeurs des coefficients de rétrodiffusion sont en accord avec le contenu en eau de l'horizon de surface. En effet, l'important évènement pluvieux se traduit par une augmentation des valeurs d'humidité de surface qui dépasse les 30%. Les niveaux de rétrodiffusion sont alors de -6 dB en bande X et -7 dB en bande C.

En bande L, seules deux acquisitions sont effectuées durant la période de culture de soja (30/05 et 16/06/2010). La végétation commence alors à se développer, surlignant les rangs de semis (Figure 76a). La dynamique observée, supérieure à 1 dB, est en accord avec les variations d'humidité de surface, et le développement de la culture.

3.1.3. Suivi d'une culture pluviale d'été (tournesol)

Au sein de la zone d'étude, la culture pluviale d'été principalement observée est le tournesol (d'autres cultures comme le sorgho, ou le chanvre complètent cette catégorie). La saison de culture s'étend sur la période comprise entre les mois d'avril et d'octobre. Les semis se déroulent au cours des mois d'avril et mai, alors que les récoltes débutent à la fin du mois d'août, et s'échelonnent jusqu'en octobre.

Les clichés, présentés ci-dessous (Figure 75), ont été réalisés durant la saison agricole. Ils illustrent les conditions de surface lors du développement du tournesol : après le semis, lorsque la végétation émerge (a), en début de la période de floraison (b), ou à la fin de la sénescence (c). Suite à la récolte, la quantité de résidus de culture est faible, avec une couverture de l'ordre de 10%. Ces morceaux de tiges et de capitule sont partiellement enfouis dans l'horizon superficiel, lors du modelage de la surface (d).



Figure 79 : Illustration de l'évolution de la culture de tournesol pour différentes périodes : a) début de la période d'émergence après semis (20/05/2010), b) début de la floraison (02/07/2010), c) fin de la sénescence avant récolte (30/08/2010), d) état de la surface après récolte et travail de la surface du sol (07/10/2010).

Comme dans le cas des deux autres cultures d'été, le tournesol est soumis à des températures élevées, au cours de son cycle phénologique. Certains exploitants disposants de matériel d'irrigation (des enrouleurs principalement), dispensent une irrigation lors de la phase végétative.

Suite à l'émergence, le développement des différents organes est rapide. Les premières feuilles du tournesol se mettent en place, elles sont suivies par l'élongation de la tige principale, et l'apparition de l'inflorescence. La floraison des capitules est suivie du développement des fruits, et de la maturation des grains. Durant la sénescence, la plante se dessèche. Les feuilles flétrissent le long de la tige principale (ou tombent sur le sol), la zone apicale se coude. (Les descriptions sont basées sur les observations réalisées sur le terrain, ainsi que sur les stades phénologiques proposés par Meier, 2001).

Les acquisitions radar, datant du 14/04/2010 (jour 104, sur la Figure 80), suivent le semis du tournesol. Les niveaux de *NDVI* sont caractéristiques d'un sol nu, avec des valeurs proches de 0,2. La surface de la parcelle est lisse, comme en témoigne la hauteur quadratique moyenne de 1,25 cm. Les dernières acquisitions micro-ondes sont réalisées sur une végétation sénescente (30/08/2010, jour 242). Dans l'optique, la dernière acquisition est effectuée après la récolte. La surface de la parcelle est alors parsemée de résidus de culture (des tiges principalement). Les valeurs de *NDVI* sont voisines de celles observées en début de saison agricole, et caractéristique d'un sol nu.

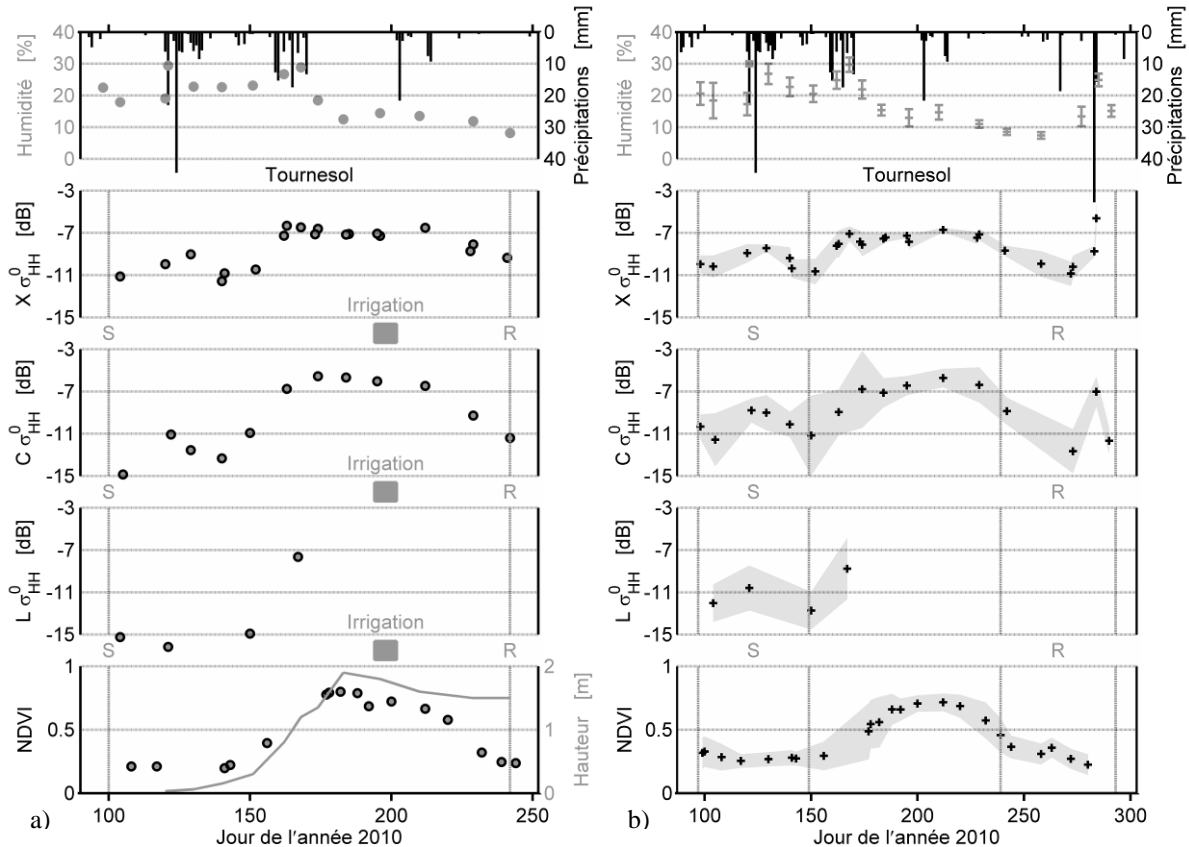


Figure 80 : Evolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes X, C et L, (polarisation HH), pour le tournesol. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales et les lettres S et R indiquent les dates (ou périodes) de semis et de récolte.

Les acquisitions réalisées en bandes X et C présentent des évolutions comparables, avec des dynamiques propres. Deux périodes contrastées sont observées, avec des évolutions des signaux radar qui soulignent les changements des conditions du sol, puis de la végétation. Les valeurs des coefficients de rétrodiffusion en bandes X et C sont tout d'abord reliées à l'humidité de surface jusqu'à l'émergence du tournesol (jour 140 environ, Figure 20a). Puis elles augmentent avec la mise en place de la culture, comme en témoignent les valeurs de *NDVI* qui augmentent également à partir de cette période. Avant le jour 140, les dynamiques des coefficients de rétrodiffusion radar sont respectivement de 2 et 4 dB, en bandes X et C. Par la suite, les dynamiques contrastées des coefficients de rétrodiffusion sont en phase avec les stades de développement de la culture. Entre les jours 140 et 174, les signaux acquis en bandes X et C augmentent respectivement de 5 et 8 dB. Durant cette période, le *NDVI* atteint les valeurs maximales de 0,8, alors que la hauteur avoisine 1,7 m. Les signaux radar saturent ensuite à des valeurs voisines de -6 dB, durant la période comprise entre les jours 174 à 212. Le *NDVI* présente également des valeurs assez stables, durant cette période qui voit la floraison du tournesol, et le développement des fruits. La hauteur atteint sa valeur maximale, avant de diminuer suite à l'inclinaison de la partie apicale de la tige. Enfin, durant la maturation des grains et la sénescence (du jour 212 à la récolte), les coefficients de rétrodiffusion diminuent. Une nouvelle fois, la dynamique observée en bande C est plus élevée (avec 5 dB), que celle présentée par les coefficients de rétrodiffusion acquis en bande X (proche de 2 dB).

Durant la période de sénescence, les valeurs de *NDVI* passent de 0,7 à 0,2 avant la récolte. Les valeurs d'humidité relative sont homogènes et inférieures à 40%.

Au sein des seize parcelles (Figure 80b), les comportements moyens des signaux satellites sont comparables à ceux observés sur la parcelle servant au suivi quantitatif. Durant l'intégralité de la saison culturale, la variabilité en bande X est inférieure à celle observée en bande C. Les écarts types sont respectivement de 0,8 contre 1,8 dB en moyenne. En bande C, ces valeurs sont maximales suite à la période de semis, où elles atteignent 3,8 dB. Durant cette même période, la diversité des états de surface est également surlignée par les écarts types associés aux valeurs de *NDVI*. Ils sont alors proches de 0,2, illustrant les différents stades de développement de la végétation. Par la suite, ces valeurs diminuent avec la saturation des signaux satellites. Durant les périodes de semis et de récolte, les données acquises en bandes X et C sont associées à des valeurs d'écarts types variables, expliquées en partie par les différents niveaux de rugosité et d'humidité de surface.

En bande L, les données acquises couvrent la première moitié du cycle phénologique du tournesol (Figure 80a). Durant cette période, les coefficients de rétrodiffusion présentent une dynamique très importante, proche de 9 dB. Les valeurs sont minimales pour les trois premières acquisitions, où elles sont comprises entre -16 et -15 dB. Durant cette période (entre les jours 104 et 151), l'humidité de surface varie entre 20 et 30%, sans engendrer d'effet notable sur le signal radar. L'acquisition du 16/05/2010 (jour 167) présente un niveau de rétrodiffusion supérieur, proche de -7 dB. A cette date, la végétation est en phase de croissance, avec une hauteur dépassant le mètre, et un *NDVI* proche de 0,5.

Durant la période de semis, les valeurs moyennes observées au sein des seize parcelles (Figure 80b), présentent une inflexion suite à l'évènement pluvieux. Après cette période, les coefficients de rétrodiffusion sont en adéquation avec le développement de la végétation. Les valeurs moyennes sont associées à d'importantes valeurs d'écart types de 2,1 dB.

3.1.4. Bilan

Les évolutions des coefficients de rétrodiffusion, acquis aux bandes X, C et L, en polarisation HH, sont spécifiques de la culture considérée. Selon la fréquence, ils surlignent des évènements particuliers, comme l'élongation des tiges sur le blé, l'apparition des siliques sur le colza, ou le développement du soja ; ou subdivisent la saison de culture en périodes similaires à celles observées en optique, comme dans le cas du tournesol. Ils offrent ainsi un complément voire une alternative aux données optiques pour le suivi des cultures.

Durant la saison de culture, les signaux radar multi-fréquences, présentent des dynamiques comprises entre 1 et 11 dB. Cette valeur maximale est observée sur le blé, en bande X. Concernant le colza et le maïs, les signaux acquis en bandes X et C présentent des dynamiques proches, avec toutefois des comportements différents. Enfin, sur les cultures de soja et de tournesol, la bande C montre des dynamiques plus marquées que la bande X.

Concernant les coefficients de rétrodiffusion acquis en bande L, les images acquises durant les premiers stades de développement des cultures d'été présentent des comportements intéressants (avec une augmentation de plusieurs dB), tout comme les signaux observés sur la culture de colza.

3.2. Apports des différentes polarisations pour le suivi des cultures saisonnières

3.2.1. Suivi des cultures pluviales d'hiver

Cas du colza

Pendant la saison de culture du colza (Figure 81a), les coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisation croisée (σ_{VH}^0 ou σ_{HV}^0) présentent une dynamique de 6 dB (contre 3 dB en co-polarisation σ_{VV}^0 ou σ_{HH}^0). Au cours des premiers stades de développement (compris entre les jours 51 à 105), seules quelques variations sont observées, elles sont inférieures à 1,5 dB. Durant la même période, le *NDVI* atteint les valeurs maximales, proches de 0,75. Le signal radar (σ_{VH}^0) augmente entre les jours 122 et 150, période qui correspond à la fin de floraison, et au développement des graines. Durant cette phase, l'architecture complexe du couvert se met progressivement en place. Le développement progressif de structures sans orientations préférentielles conduit à un maillage complexe, qui explique l'augmentation du signal. Le *NDVI* présente alors de faibles variations, avec des valeurs proches de 0,7. Au cours du développement du colza, le signal acquis en cross-polarisation n'est pas affecté par les variations d'humidité de surface.

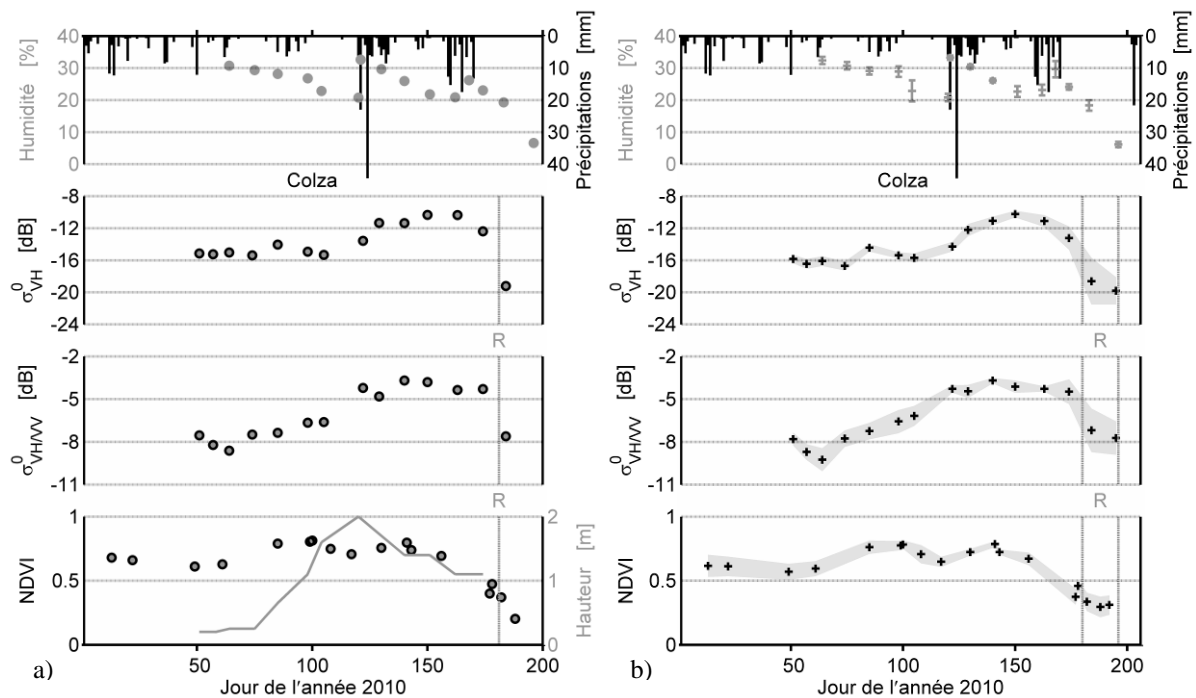


Figure 81 : Évolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C (σ_{VH}^0 et $\sigma_{VH/VV}^0$), pour le colza. Les précipitations, l'humidité du sol, le *NDVI* et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales ainsi que la lettre R indiquent la date (ou période) de récolte.

Avec une augmentation linéaire d'environ 5 dB entre les jours 64 et 140, le rapport entre les polarisations *VH* et *VV* est particulièrement intéressant pour le suivi de cette culture (Figure 81a). Au cours de la sénescence (du jour 150 jusqu'à la récolte), le rapport sature à des valeurs proches de -4 dB, alors que le *NDVI* décroît jusqu'à 0,4. La diminution de la teneur en eau de la végétation, ou les variations d'humidité de surface n'induisent alors

aucun effet significatif. Le passage végétation sénescente à sol nu avec résidus de culture, est clairement identifiable avec une baisse de plusieurs dB. La différence entre les images acquises avant et après récolte est de 6 dB en polarisation croisée, et 3 dB en considérant le rapport de polarisation. Cette diminution importante du signal radar est expliquée par la faible rugosité du sol, combinée aux conditions sèches du sol, courantes lors de la période de récolte.

Les évolutions temporelles observées sur les douze parcelles sont semblables à la tendance observée sur la parcelle sélectionnée (Figure 81b). Les signaux acquis en polarisation croisée sont stables dans l'espace, comme en témoignent les faibles écarts types observés tout au long du cycle de végétation (0,8 dB en moyenne). La variabilité est légèrement plus importante avec le rapport de polarisation, durant la période comprise entre les jours 51 à 105. Elle est associée à l'hétérogénéité des conditions du sol (ayant un impact sur la polarisation VV). Cette dispersion diminue avec le développement de la culture, en raison de la réduction de la profondeur de pénétration du signal dans la végétation Ulaby et al., 1986. Concernant le *NDVI*, la variabilité est maximale durant les premiers stades de phénologiques, elle diminue avec le développement de la végétation.

Sur cette culture, les comportements des signaux radar sont d'une part contrastés, et différents de l'évolution des données optiques. Ils offrent par conséquent des possibilités de suivi de la culture complémentaires au *NDVI*, en combinant les dynamiques observées en polarisation croisée et celles du rapport *VH/VV*.

Cas du blé

Durant la saison de culture du blé, les coefficients de rétrodiffusion acquis avec la polarisation VV varient de 10 dB (Figure 82a). Deux périodes particulièrement intéressantes sont observées lors du développement de la culture. La première, comprise entre les jours 85 et 122, correspond à la phase d'élongation des tiges. Le contenu en eau de la végétation est alors maximal, supérieur à 90%. Pendant cette phase, alors que l'indice de végétation atteint des valeurs maximales proches de 0.8, le signal radar diminue linéairement. Le *NDVI* et les coefficients de rétrodiffusion saturent à la même période. Puis, le signal radar (σ°_{VV}) augmente régulièrement, durant la période comprise entre les jours 150 jusqu'à la récolte. La sénescence de la culture est alors identifiée par la diminution du *NDVI*, qui atteint des valeurs voisines de 0,25 avant la récolte. Ce comportement des coefficients de rétrodiffusion (particulièrement avec la polarisation VV) est associé à une augmentation de l'absorption par la culture lorsque la végétation est humide, et à l'effet inverse, quand la végétation est sèche (Cookmartin et al., 2000). Sur cette parcelle, le signal radar ne semble pas affecté par les variations d'humidité de surface.

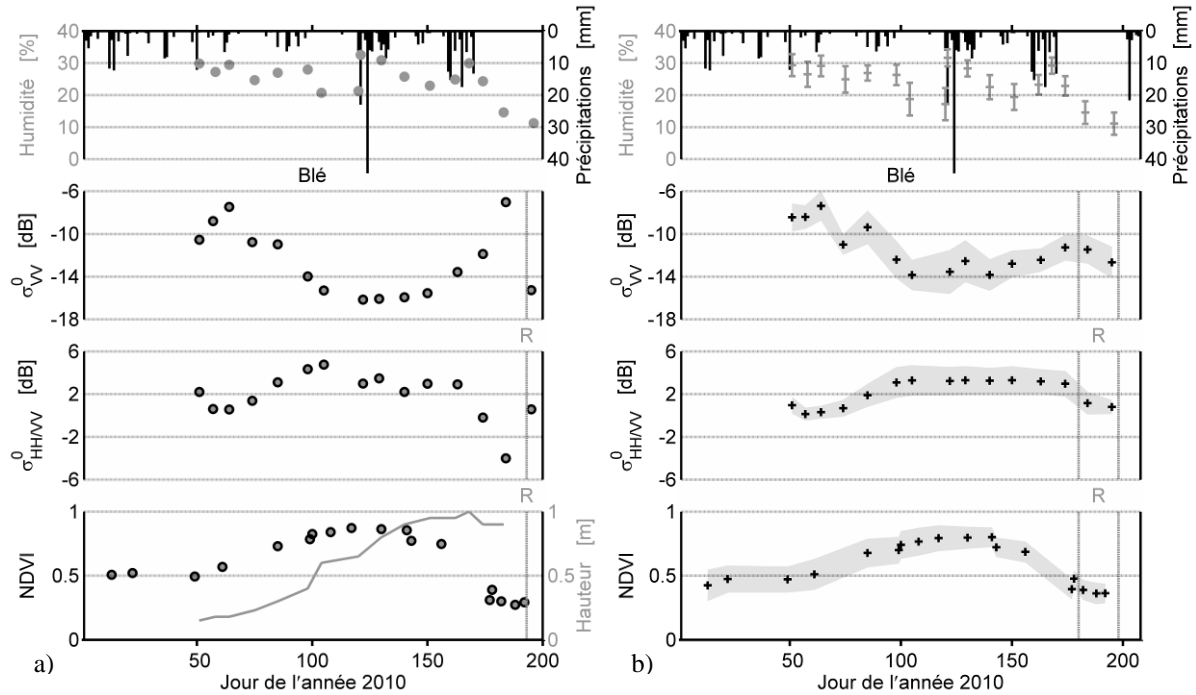


Figure 82 : Évolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C (σ_{VV}^0 et σ_{HHVV}^0), pour le blé. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales ainsi que la lettre R indiquent la date (ou période) de récolte.

Sur les soixante-dix parcelles (Figure 82b), la diminution du signal est clairement visible au cours cycle phénologique. Elle est toutefois associée à une importante variabilité, comme l'ensemble des valeurs acquises durant la saison de culture, avec un écart-type moyen proche de 1,4 dB. Le décalage de développement de la végétation au sein des différentes parcelles, ainsi que la différence des niveaux de biomasse et de hauteur des cultures expliquent d'une part, la variabilité observée, et la difficulté à discerner une tendance claire lors de la sénescence. L'inflexion qui suit l'événement pluvieux, est une nouvelle fois uniquement visible sur les soixante-dix parcelles. L'effet de l'humidité du sol est moins important avec une polarisation verticale (par rapport à la polarisation l'horizontale), les coefficients de rétrodiffusion étant dominés par la composante végétation.

L'évolution temporelle du rapport σ_{HHVV}^0 présente deux phases distinctes (Figure 82a). Lors des premiers stades de développement de la culture, les valeurs sont proches de 0 dB. Elles augmentent linéairement au cours de l'élongation des tiges, puis une légère baisse est observée, enfin le signal diminue fortement (7 dB) jusqu'à la récolte. Une tendance similaire est observée sur les soixante-dix parcelles avec une augmentation d'environ 4 dB entre les jours 64 à 105 (Figure 82b). Pendant cette période, le NDVI augmente également, passant de 0,5 aux valeurs maximales. Le comportement observé avant la récolte sur la parcelle d'intérêt (Figure 82a) ne doit pas être considéré comme une généralité. Sur cette parcelle, l'évolution du signal radar s'explique en partie par la verse du blé (chute du blé en raison de la période venteuse) induisant de fortes valeurs en polarisation VV, et de faibles valeurs concernant le ratio. Sur les soixante-dix parcelles, aucune différence significative n'est observée dans les domaines optiques ou micro-ondes. En outre, tous les signaux satellites saturent à la même date (jour 100). Le NDVI présente une variation significative au cours de la sénescence ; période également soulignée par

une légère augmentation des coefficients de rétrodiffusion acquis avec la polarisation VV. Les variations d'humidité du sol n'affectent pas le *NDVI*, ou le rapport de polarisation quelle que soit l'échelle d'étude.

3.2.2. Suivi des cultures irriguées d'été

Cas du maïs

Durant la période comprise entre le semis et la récolte du maïs, les coefficients de rétrodiffusion acquis avec la polarisation croisées (σ_{VH}^0 ou σ_{HV}^0) présentent une dynamique de 8 dB (Figure 83a). La valeur minimale (proche de -22 dB, au jour 150) délimite deux périodes caractérisées par des évolutions contrastées des signaux radar. A cette date, les premières feuilles de la culture se mettent en place. Avant cette acquisition, la diminution des valeurs des coefficients de rétrodiffusion est en adéquation avec l'assèchement de la surface, comme en témoignent les valeurs d'humidité qui passent de 30 à 20%. Le *NDVI* est alors caractéristique d'un sol nu, avec des valeurs proches de 0,2. Passé le jour 150, les signaux radar augmentent linéairement, avec une dynamique de 6 dB, en accord avec l'important développement du couvert végétal. Les valeurs de *NDVI* dépassent 0,5, et la hauteur atteint 1,5 m. L'humidité de surface augmente également suite aux événements pluvieux. Par la suite, l'augmentation des coefficients de rétrodiffusion est moins prononcée (inférieure à 2 dB). La valeur maximale (proche de -14 dB) est observée avant la récolte de la culture. Elle suit l'importante précipitation, où le cumul journalier est supérieur à 50 mm. Seules les valeurs de *NDVI* témoignent de la sénescence avec une diminution régulière.

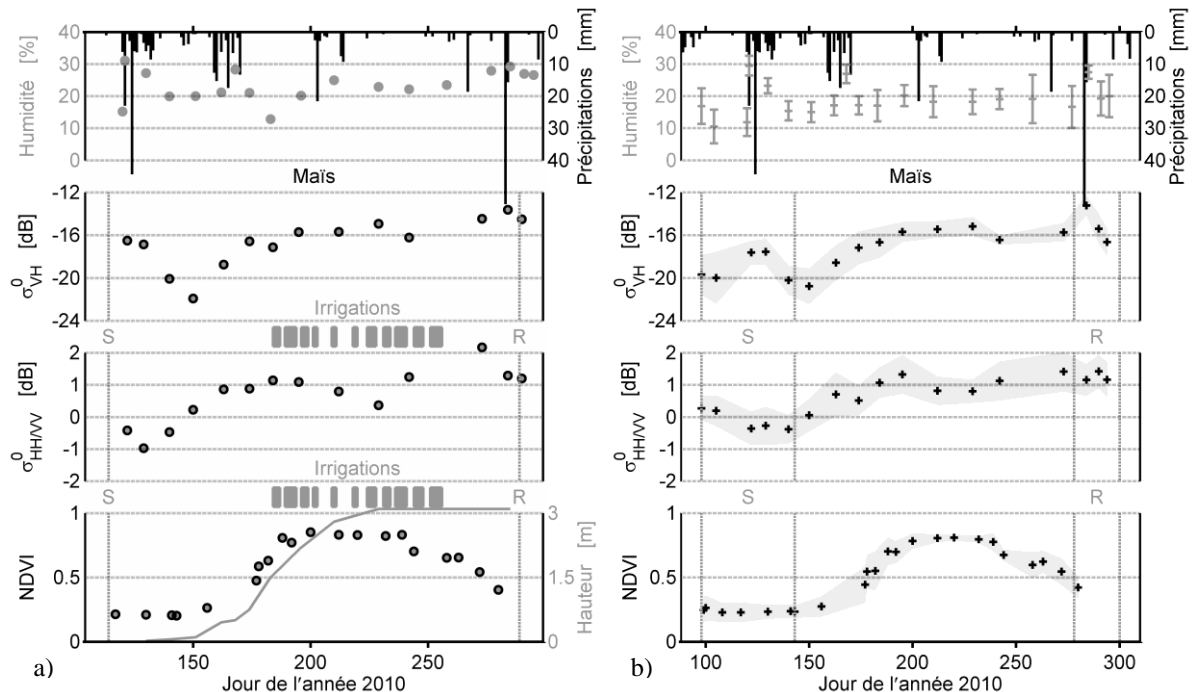


Figure 83 : Évolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C (σ_{VH}^0 et $\sigma_{HH/VV}^0$), pour le maïs. Les précipitations, l'humidité du sol, le *NDVI* et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). Les périodes d'irrigation sont matérialisées par les rectangles gris. La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales grises et les lettres S et R indiquent les dates (ou périodes) de semis et de récolte.

Au sein des vingt-huit parcelles (Figure 83b), les signaux radar acquis en polarisation croisée sont également affectés par les paramètres liés au sol dans une première phase, puis par le développement de la végétation. Durant la période de semis jusqu'au jour 150, les signaux moyens radar sont en phase avec l'humidité de surface. Ils sont associés à une importante variabilité de 2,4 dB au maximum, expliquée par les différences, d'humidité de surface et de niveaux de rugosité (toutes les parcelles n'étant pas encore semées). Par la suite, la contribution de la végétation sur le signal devient majoritaire. La variabilité diminue durant le cycle phénologique, elle est minimale avant la sénescence, où elle avoisine 0,4 dB. Cette tendance s'explique par les différents stades de développement de la végétation, observés en début de saison agricole. En s'échelonnant sur deux mois, la période de semis induit un décalage de développement, progressivement compensé par l'emploi de différents cultivars. Elles sont caractérisées par des cycles végétatifs plus ou moins longs, et qualifiées de tardives ou précoces.

Le rapport de co-polarisation présente une évolution particulière (Figure 83a), avec des valeurs comprises entre -1 et 2 dB. Une augmentation linéaire du signal (proche de 2 dB) est tout d'abord observée, entre les jours 129 et 163. Cette dynamique est en adéquation avec les premiers stades de développement de la culture, suite à la phase d'émergence. Les valeurs saturent par la suite, alors que la hauteur du couvert dépasse les 50 cm. Le rapport diminue, avant d'augmenter durant la période de sénescence. Cette évolution particulière peut s'expliquer par une augmentation de la contribution du sol, alors que les feuilles sèchent et se recroquevillent.

Au sein des vingt-huit parcelles (Figure 83b), les signaux moyens présentent une évolution similaire à la parcelle d'intérêt, avec toutefois une différence en fin de cycle végétatif, où l'augmentation du signal est moins prononcée. Les valeurs des écarts types sont assez proches tout au long de la saison de culture, avec une valeur moyenne de 0,5 dB.

Cas du soja

Pour le soja, les coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisation croisée (σ°_{VH} ou σ°_{HV}), et ceux en co-polarisation (σ°_{HH} ou σ°_{VV}) présentent des évolutions, et des dynamiques proches (Figure 84a). Les valeurs minimales sont observées après le semis, pendant l'émergence alors que celles de *NDVI* sont caractéristiques d'un sol nu (valeurs proche de 0,2). Les coefficients de rétrodiffusion augmentent par la suite, de manière linéaire en polarisation verticale ; une légère inflexion est observée concernant la polarisation croisée. Les dynamiques sont respectivement de 7 et 9 dB. Elles sont en phase avec le développement de la culture, plus particulièrement avec l'évolution de la hauteur, qui atteint sa valeur maximale (1 m) au jour 229. Durant cette même période, le *NDVI* présente une augmentation rapide entre les jours 174 et 200, puis sature à 0,9, à l'inverse des signaux radar. Les variations d'humidité de surface (entre 16 et 31%) ne semblent pas affecter le signal radar. Par la suite, les coefficients de rétrodiffusion diminuent pendant la sénescence, de manière plus précoce en polarisation *VV*, comparé à la polarisation *VH*, avec des dynamiques respectives de 6 et 2 dB. Durant la même période, les valeurs de *NDVI* diminuent de manière linéaire, surlignant la sénescence du couvert végétal.

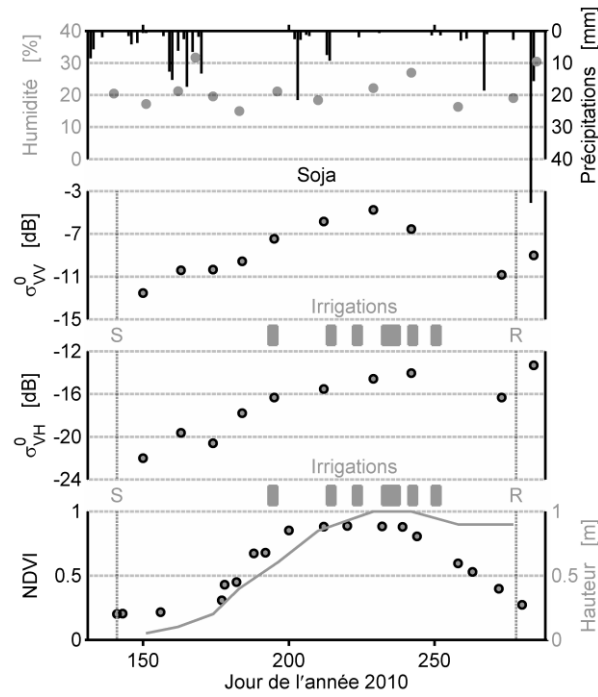


Figure 84 : Évolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C (σ_{VV}^0 et σ_{VH}^0), pour le soja. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont également présentés. Les périodes d'irrigation sont matérialisées par les rectangles gris. Les lignes verticales et les lettres S et R indiquent les dates de semis et de récolte.

3.2.3. Suivi d'une culture pluviale d'été

Pendant la saison de culture du tournesol, les coefficients de rétrodiffusion radar acquis en bande C présentent des évolutions et des dynamiques proches, quelle que soit la polarisation considérée : environ 8 dB (Figure 85a). Deux périodes distinctes se remarquent : les variations sont tout d'abord en lien avec des paramètres du sol, puis elles soulignent les changements de la végétation (ces comportements sont proches de ceux observés avec la polarisation *HH*). Néanmoins, quelques différences sont observées durant la période où les signaux radar sont dominés par l'influence de la végétation. Les coefficients de rétrodiffusion, acquis en polarisation croisée saturent légèrement plus tôt que ceux acquis avec la polarisation verticale. D'autre part, la dynamique observée durant la sénescence jusqu'à la récolte est également plus prononcée avec la polarisation verticale (4 dB contre 6 dB).

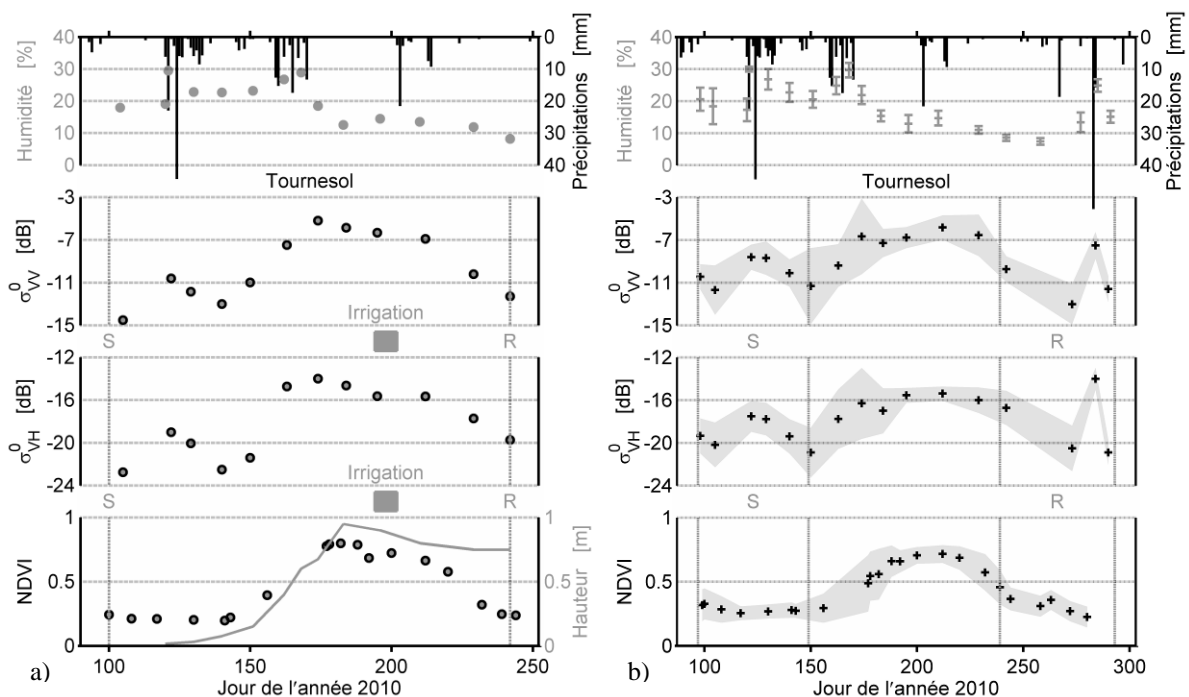


Figure 85 : Évolutions temporelles des coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C (σ_{VH}^0 et σ_{VV}^0), pour le tournesol. Les précipitations, l'humidité du sol, le NDVI et la hauteur de la culture sont présentés dans l'approche mono-parcelle a). La période d'irrigation est matérialisée par le rectangle gris. La dispersion des signaux est représentée par une bande grisée dans l'approche multi-parcelles b). Les lignes verticales grises et les lettres S et R indiquent les dates (ou périodes) de semis et de récolte.

Cette évolution similaire des différentes polarisations est particulièrement intéressante. Elle est à rapprocher du développement des différentes structures du couvert, comme les tiges, les feuilles, et les capitules, qui se mettent en place progressivement au cours de la saison de culture. Ainsi, la période suivant la phase d'émergence (entre les jours 140 et 174), voit le développement de la tige, et la mise en place des feuilles le long de celle-ci par nœuds successif. Ces différentes structures, verticales (dans le cas des tiges) et horizontales (dans le cas des feuilles), induisent une augmentation du signal radar, qui peut s'expliquer par une augmentation de la rétrodiffusion directe (la végétation augmentant la rugosité de surface), ou par des mécanismes de doubles rebonds (les signaux entrant en contact avec la surface du sol et la végétation). Ces mécanismes sont observés alors que les contenus en eau de la végétation sont maximum (proches des 90%). La perte d'eau dans la

végétation, durant la période de sénescence, est surlignée par une baisse des coefficients de rétrodiffusion dans toutes les polarisations. La mise en place et le développement du capitule s'accompagnent d'une saturation du signal.

Les signatures observées au sein des seize parcelles (Figure 85b) présentent des évolutions similaires à celles de la parcelle d'intérêt (Figure 85a), avec des valeurs d'écart type proches (1,7 dB en moyenne). La variabilité maximale est observée après la période de semis, avec un maximum de 3,3 dB pour la polarisation croisée, et 3,6 dB pour la co-polarisation. Cette importante variabilité s'explique par le décalage de développement de la culture (engendré par les dates de semis), observé au sein des différentes parcelles. Suite à l'apparition du capitule, la variabilité des signaux radar diminue. Elle reste toutefois importante, supérieure à celle observée sur la culture de blé (1,4 dB en moyenne, en polarisation VV), en raison de l'hétérogénéité plus marquée du tournesol.

3.2.4. Bilan

Durant la saison de culture, les signaux radar acquis en bandes C, avec les quatre états de polarisation (*HH*, *VV*, *HV* et *VH*), sont associés à des dynamiques pouvant atteindre 10 dB. Sur le blé, la dynamique maximale est observée avec la polarisation *VV*, durant l'élongation des tiges. Les premiers stades de développement du maïs, ainsi que le développement des siliques du colza, sont surlignés par les signaux acquis en cross-polarisation (*HV* ou *VH*), avec des dynamiques proches de 6 dB. Enfin, sur les cultures de soja et de tournesol, les différents états de polarisation présentent des évolutions et des dynamiques assez proches (voisines de 8 dB).

Les rapports de polarisation offrent, sur certaines cultures, des informations complémentaires de celles observées en polarisation simple. C'est le cas du blé ou du maïs avec le rapport de co-polarisation, ou le rapport cross-, co-polarisation concernant le colza.

4. COMPARAISON DE LA SENSIBILITE DES DONNEES SATELLITES AUX PARAMETRES DES CULTURES

En télédétection, différentes approches sont mises en œuvre pour estimer les paramètres des couverts végétaux. L'inversion de variables d'intérêt peut ainsi s'appuyer sur des modèles de transfert radiatif cohérents ou incohérents, comme ceux utilisés par (Karam et al., 1992; Mangiarotti et al., 2008; Monsivais-Huertero and Judge, 2011; Picard et al., 2003). Basés sur un formalisme lourd, ils sont spécifiques d'une culture donnée (du blé, ou du maïs par exemple) et nécessitent un nombre important de paramètres d'entrée afin de décrire les couverts (en lien avec l'architecture de la végétation). Dans la plupart des cas, ils sont utilisés dans le sens direct, c'est-à-dire en vue de l'estimation des coefficients de rétrodiffusion à l'aide de données de terrain. Ils servent alors à la compréhension des mécanismes de diffusion (simple diffusion, double diffusion, interactions croisées...), ou à la détermination des contributions des différents organes constitutifs du couvert, à l'échelle d'une parcelle, ou d'une portion de parcelle. L'inversion des paramètres de surface par ce moyen est souvent délicate, à cause des problèmes d'équifinalité des modèles.

Une autre approche de modélisation est également utilisée, représentée par les modèles du type du « Water Cloud Model » développé par Attema et Ulaby en 1978. L'approche consiste à tirer parti à la fois de la grande couverture spatiale des images satellites, tout en gardant une certaine approche physique pour définir l'atténuation du signal, et son interaction avec la végétation. Dans cette approche, le signal rétrodiffusé est scindé en deux composantes : sol et végétation, avec une simplification importante des descripteurs de la végétation. Selon les auteurs, les paramètres suivants sont pris en compte : indice foliaire, hauteur, biomasse, ou contenu en eau de la biomasse (Dabrowska-Zielinska et al., 2007; Joseph et al., 2010; Moran et al., 1998; Ulaby et al., 1984). Ce type de modèle est fortement dépendant de la parcelle d'étude, et leur mise en place nécessite une phase d'apprentissage (ou calibration), afin d'estimer les jeux de paramètres décrivant le compartiment sol et la végétation. L'inversion des modèles permet l'estimation de l'humidité de surface, et/ou des variables relatives à la végétation, mais leur utilisation implique une perte totale de l'information architecturale du couvert (nécessaire pour détecter les stades phénologiques des cultures).

La dernière approche, qualifiée d'empirique, est basée sur les relations établies entre les paramètres d'intérêt et le signal satellites. L'avantage des approches empiriques réside dans la facilité de leur mise en œuvre, à condition de disposer d'une importante base de données, afin de couvrir une large variabilité des conditions de surface. L'inconvénient principal réside dans le fait qu'elles sont en général liées aux limites de généralisation, les relations restant inféodées aux sites servant à leur mise en place, et aux pratiques culturales observées.

En lien avec les objectifs de la thèse, quelques exemples d'estimation de hauteur et d'indice foliaire à l'aide de signaux radar (toutes fréquences confondues) sont par la suite présentés.

Suivi de la hauteur

Dans le cas de la hauteur des cultures, différents approches sont mises en œuvre afin de relier ce paramètre au signal radar. Les travaux d'Engdhal et al., 2001, comparent les valeurs de hauteur (des cultures de blé, betterave et pomme de terre), à un indice interférométrique (à savoir la cohérence), extrait des acquisitions satellites ERS. Ballester-Berman and Lopez-Sanchez, 2012 relient la hauteur du colza à un paramètre de décomposition polarimétrique. L'ensemble de ces travaux est focalisé sur l'étude de la hauteur pour une date donnée (ou 2 dates), mais aucune approche ne permet de voir l'évolution de ces relations en fonction du temps, et donc de l'évolution de la culture en termes de stade phénologique et d'architecture. Les travaux de Bouman et al., 1991 étudient par contre le comportement des signaux rétrodiffusés (à savoir gamma) acquis en bande X, lors d'une saison complète de culture du blé. Ces derniers montrent une forte diminution avec l'augmentation de la hauteur, qui est estimée sur la base d'une relation logarithmique empirique. Toutefois, ces travaux ne s'appuient pas sur des images satellites, et les parcelles de blé suivies sont totalement contrôlées. La transposabilité des résultats à l'échelle de parcelles agricoles en milieu naturel n'est pas assurée.

Les travaux de Baghdadi et al., 2009 sur la canne à sucre, analysent la sensibilité des coefficients de rétrodiffusion vis-à-vis de la hauteur du couvert. Dans cette étude, les signaux radar sont acquis aux bandes X, C et L, par les satellites TerraSAR-X, Envisat, et Alos (Figure 86) (données comparables à celles utilisées dans ces travaux de thèse). La dynamique maximale est observée avec les coefficients de rétrodiffusion acquis en bande L, avec 6 dB ; elle est de 4 dB, en bandes X et C. Les signaux radar saturent à des hauteurs similaires en bandes X et C (120 cm), et de 210 cm en bande L.

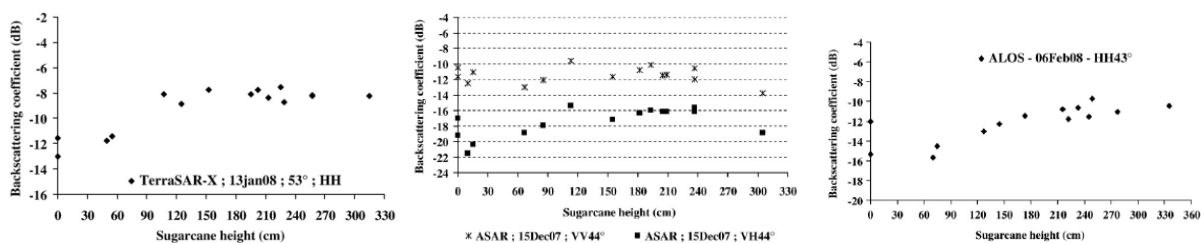


Figure 86 : Relations entre la hauteur de la canne à sucre, et les coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes X, C et L.(Baghdadi et al., 2009)

Bien que les travaux d'Inoue et al., 2002 soient effectués sur une culture de riz, ils en demeurent tout à fait intéressants car ils permettent de se rendre bien compte de l'impact de la fréquence sur l'interaction culture/onde électromagnétique. Les mesures ont été réalisées tout au long d'un cycle cultural, dans les bandes Ka, Ku, X, C et L, en co et cross-polarisation, pour des angles compris entre 25 et 55°. Face à la hauteur du riz, les meilleures corrélations sont obtenues avec les basses fréquences (bandes C et L), avec des valeurs excédant 0,80. Ces observations sont comparables vis-à-vis de l'indice foliaire, avec toutefois des résultats contrastés selon les configurations considérées (en terme d'angle d'incidence et de polarisation).

Suivi de l'indice foliaire

Concernant les effets de l'indice foliaire sur les mesures radar, Macelloni et al., 2001 distinguent deux catégories de cultures en fonction du type de feuilles ('narrow leaf' vs 'broad leaf'). La Figure 87 présente des exemples des relations établies entre l'indice foliaire, et les coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes L et C en polarisation VV, à 35° (données aéroportées). Sur les cultures de tournesol, maïs et sorgho, les coefficients de rétrodiffusion augmentent avec le LAI (Figure 87a). Les relations empiriques sont associées à des coefficients de corrélation compris entre 0,43, et 0,84 (selon les polarisations considérées, à savoir HH, VV ou HV). A l'inverse, les signaux radar diminuent dans le cas du blé ou de l'alfalfa, avec des coefficients de corrélation compris entre 0,31 et 0,67.

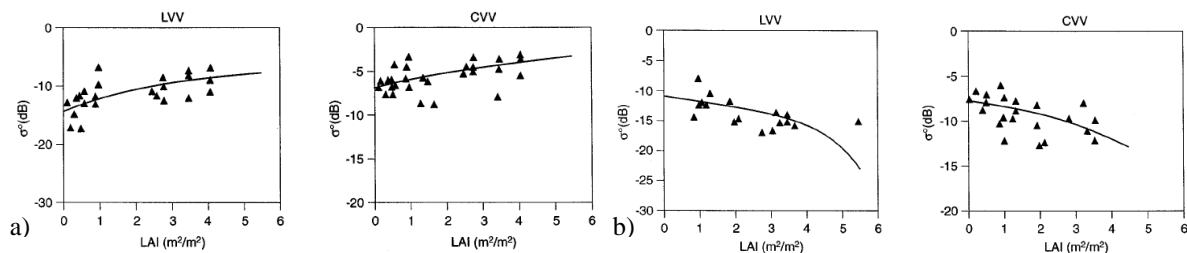


Figure 87 : Relations entre les coefficients de rétrodiffusion acquis en bandes L et C, sur des cultures de tournesol, maïs et sorgho a), et sur du blé et alfalfa b).

Dans l'étude présentée par Brakke et al., 1981, les mesures d'indices foliaires collectées sur les cultures de blé, sorgho, et maïs sont regroupées. Elles sont confrontées aux données micro-ondes acquises à des fréquences allant de 8,6 à 35,6 GHz, pour des angles compris entre 30 et 70°, en co- et cross-polarisation. Les résultats montrent une importante dispersion, avec coefficients de corrélation qui varient entre -0,26 et 0,57.

A l'inverse, les travaux de Bach et al., 2012 sont réalisés sur une seule culture : le blé. L'indice foliaire est alors confronté aux données acquises en bande X, avec la polarisation VV (Figure 88). Le signal radar diminue de manière linéaire, avec un coefficient directeur proche de 2,3 dB par unité de LAI. La relation empirique est associée à un coefficient de détermination correct, de 0,74.

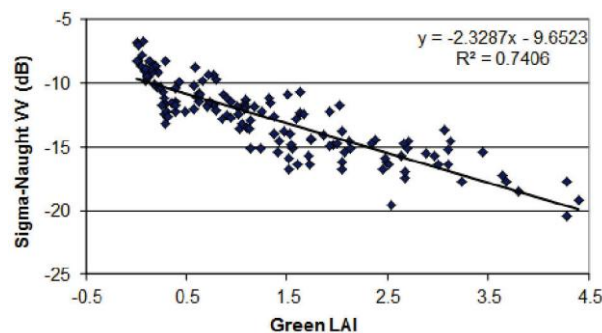


Figure 88 : Relation entre l'indice foliaire et les coefficients de rétrodiffusion acquis en bande X sur du blé.

Dans les travaux de Dente et al., 2008, les valeurs d'indice foliaire sont estimées à partir du rapport de co-polarisation (HH/VV), acquis en bande C, entre la fin du tallage et l'épiaison du blé. Les estimations du LAI sont

dérivées d'une relation empirique non-linéaire, caractérisée par un coefficient de détermination de 0,82, et une erreur proche de $0,4 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$. Ces valeurs sont par la suite assimilées dans un modèle de croissance de culture (CERES-Wheat).

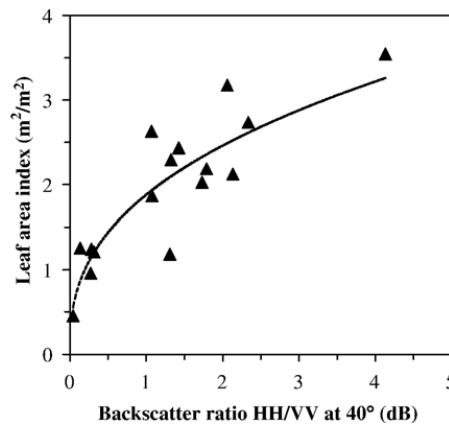


Figure 89 : Relation entre les coefficients de rétrodiffusion, acquis en bande C, et l'indice foliaire du blé.

Les analyses présentées par Jiao et al., 2010 portent sur les cultures de maïs et de soja. Elles s'appuient sur cinq acquisitions radar, délivrées par TerraSAR-X, Radarsat-2 et Alos. Les résultats obtenus sont fonction de la culture et de la fréquence. Dans le cas du maïs, les meilleures corrélations sont associées à la bande L, avec des valeurs supérieures à 0,90 (en polarisations *HH* ou *HV*). A l'inverse, elles sont quasi-nulles en bande X. En bande C, les valeurs sont comprises entre 0,68 et 0,90, selon les polarisations considérées. Concernant le soja, la bande C offre les meilleures perspectives de suivi du *LAI*, avec des corrélations comprises entre 0,47 et 0,80, dépendantes de la polarisation (*HH*, *HV* ou *VV*) et de l'angle d'incidence (26 et 40°).

En résumé, les études traitant de la sensibilité des coefficients de rétrodiffusion face aux paramètres de la végétation sont établies sur un nombre limité de culture (surtout dans le cas de la hauteur). Elles sont en outre basées sur un nombre restreint de date, ou limitée à un stade précis de développement du couvert. D'autres part, elles présentent rarement un large panel de configurations satellites (données optique et radar, présentant différentes fréquences et polarisations), couplée à des données terrain synchrones.

Dans ce contexte, la méthode proposée pour l'étude de la sensibilité des données s'appuie sur des données multi-fréquences et multi-polarisations, acquises sur un même site d'étude. Les biais liés à la spécificité d'une zone d'étude (différences de climat, de type de sol, de pratiques culturales...), ou à l'emploi de différents protocoles pour la collecte des mesures sont par conséquent minimisés. Dans ces travaux, les mesures de hauteur sont issues de la collecte terrain, et le *LAI* est dérivé des données optiques, sur la base de la relation proposée par Liu et al., 2009 (avec une interpolation journalière des valeurs).

La présentation des résultats est tout d'abord focalisée sur la relation offrant les meilleures performances, dans le domaine des micro-ondes (et comparée à l'optique dans le cas de la hauteur). Pour chacun des paramètres, et chaque culture suivie, le bilan des performances multi-fréquences et multi-polarisation est ensuite présenté. Les phases de sénescence des cultures ne sont pas considérées. Les fonctions empiriques sont établies entre l'émergence et la valeur maximale estimable du paramètre de la culture.

4.1. Estimation du LAI et de la hauteur des cultures pluviales d'hiver

Cas du LAI

Dans le cas de la culture de **colza**, les meilleurs résultats sont obtenus en utilisant le rapport entre les polarisations HV et HH , en bande C (Figure 90a). Avec un coefficient de détermination de 0,69 (et une erreur relative sur le LAI de 15%), ce ratio permet d'estimer le LAI jusqu'à ses valeurs maximales (proches de $3,8 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$). Sur cette culture, le développement de la végétation s'accompagne d'une augmentation des valeurs des coefficients de rétrodiffusion. A l'inverse sur la culture de **blé**, la bande X (polarisation HH) présente une forte décroissance durant la période végétative (Figure 90b). La sensibilité observée est proche de 2,6 dB, lorsque le LAI augmente d'une unité. Cette décroissance quasi-linéaire, permet une estimation du LAI jusqu'aux valeurs maximales (proches de $4,4 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), avec les performances statistiques suivantes : $R^2 = 0,64$ et $rRMSE = 26\%$.

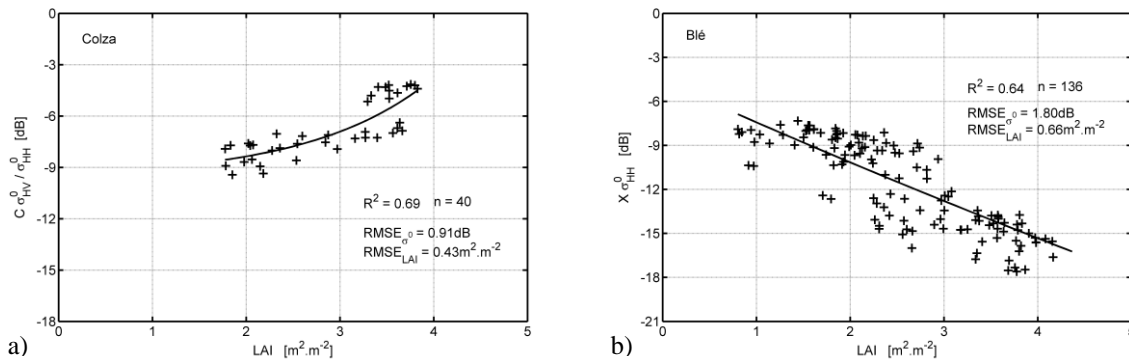


Figure 90 : Relations empiriques entre l'indice foliaire du colza a) et du blé b), et les coefficients de rétrodiffusion, $\sigma_{C-HV/HH}^0$ et σ_{X-HH}^0 respectivement.

La Figure 91 présente un bilan des performances des données multi-fréquences pour le suivi du LAI, concernant les cultures pluviales d'hiver. Les valeurs maximales de hauteur (observées durant les acquisitions satellites) sont notées en noir sur la figure du haut. Les hauteurs maximales détectables sont notées en gris pour chaque configuration satellite. Pour chaque relation, deux indicateurs statistiques sont présentés, à savoir le coefficient de détermination et l'erreur quadratique moyenne relative. Ils sont respectivement représentés par des bandes grises, et des points noirs. (Dans la représentation graphique suivante, les relations dont l'erreur quadratique moyenne relative est trop importante sont artificiellement limitées à 100%).

Dans le cas du **colza** (Figure 91a), les relations empiriques présentent des coefficients de détermination compris entre 0,35 et 0,70, avec des erreurs relatives inférieures à 15% (excepté dans le cas du rapport de co-polarisation, en bande C). Les meilleurs résultats sont obtenus par les relations basées sur les rapports combinant cross- et co-polarisations en bande C, suivis des bandes L et X. Les coefficients de détermination sont alors supérieurs à 0,50, et la saturation des coefficients de rétrodiffusion est observée une fois la valeur maximale de LAI atteinte.

Les résultats sont plus contrastés concernant le **blé** (Figure 91b). Les coefficients de détermination sont compris entre 0,10 et 0,64 ; ils sont associés à des erreurs relatives allant de 8 à 62%. Seules les relations basées sur les coefficients de rétrodiffusion acquis en bande X, avec la polarisation HH , et en bande C, avec la

polarisation VV présentent des résultats acceptables. Les coefficients de déterminations sont alors voisins de 0,60, avec des erreurs inférieures à 20%.

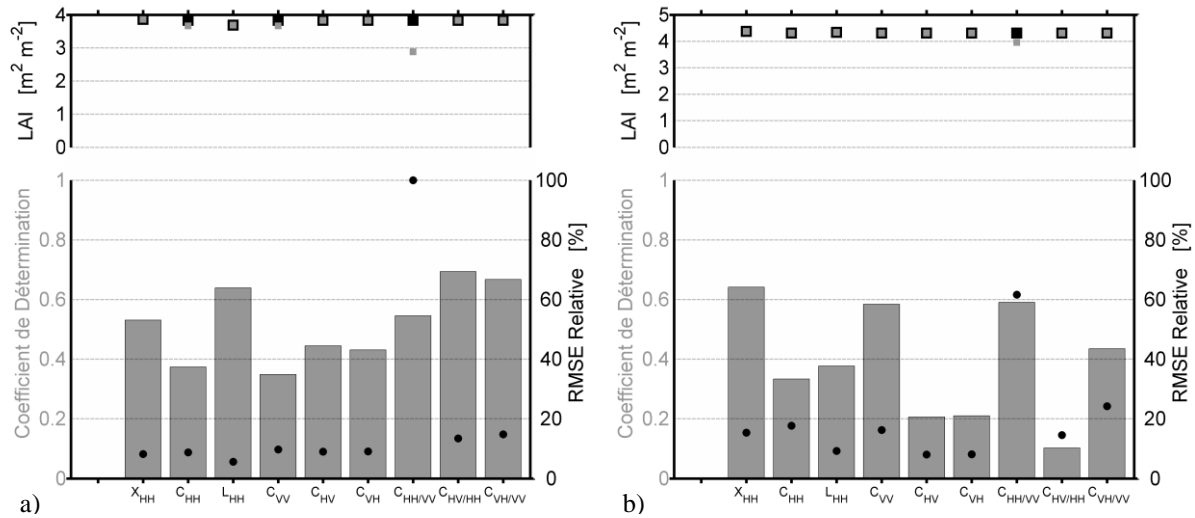


Figure 91 : Bilan des performances statistiques associées aux relations empiriques entre le LAI du colza a) et du blé b), et les signaux satellites. Les valeurs maximales d'indice foliaire, ainsi que le niveau de saturation, sont indiqués au-dessus des indicateurs statistiques, en noir et gris respectivement.

Cas de la hauteur

La Figure 92 présente les relations obtenues entre la hauteur du **colza**, et les signaux satellites optique et radar. Avec un R^2 égal de 0,91 et une $RMSE$ sur l'estimation de la hauteur de 29 cm, la relation basée sur le $NDVI$ offre de meilleures performances statistiques que celle prenant en compte les coefficients de rétrodiffusion. Néanmoins, ces performances sont obtenues pour des valeurs de hauteur inférieures aux valeurs maximales observées (130 cm contre 200 cm). En outre, la dispersion des valeurs de $NDVI$ est importante lorsque les valeurs de hauteur n'excèdent pas 1 mètre, puis elles saturent au-delà d'une hauteur de 90 cm environ (Figure 92a). Le ratio entre les polarisations HV et HH en bande C offre des performances acceptables pour l'estimation de la hauteur, avec un R^2 de 0,76 et une erreur de 37 cm. La relation entre les signaux radar et le paramètre de végétation est quasi-linéaire, avec une sensibilité voisine de 0.02 dB par cm, pour des valeurs de hauteur allant de 20 à 200 cm.

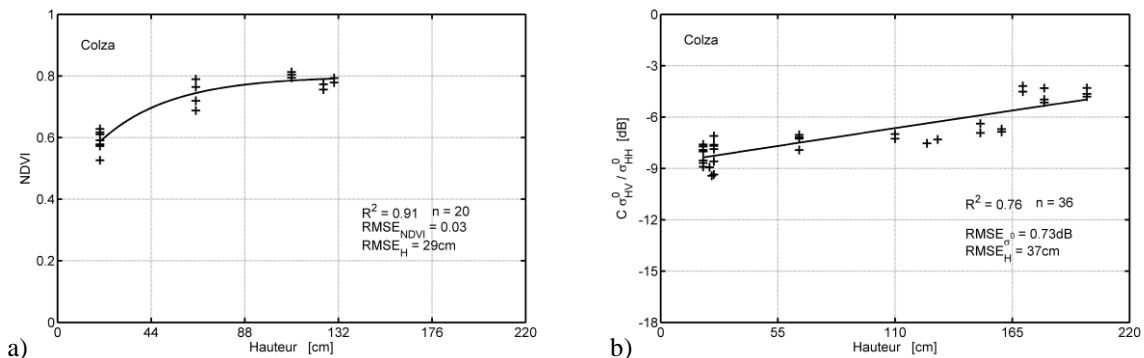


Figure 92 : Relations empiriques entre la hauteur du colza et les signaux satellites, $NDVI$ a) et $\sigma^0_{C-HV/HH}$ b).

Dans le cas du **blé**, les meilleures relations sont obtenues entre la hauteur, et le *NDVI* ou les coefficients de rétrodiffusion acquis en bande X (Figure 93). Les deux relations présentent une importante dispersion, et des coefficients de détermination similaires (0,76 contre 0,77). Les dynamiques observées dans les domaines optiques et micro-ondes sont opposées. Les valeurs de *NDVI* augmentent avec la hauteur, alors qu'elles diminuent en bande X (due à l'absorption dans le couvert). Dans le cas du *NDVI*, la relation sature pour des valeurs de hauteur supérieures à 40 cm. L'estimation de la hauteur est associée à une erreur de 17 cm. Cette erreur est moins importante (10 cm), en considérant les données micro-ondes. En outre, la relation linéaire permet une estimation du paramètre jusqu'à 65 cm, avec une sensibilité marquée de 0,13 dB par cm.

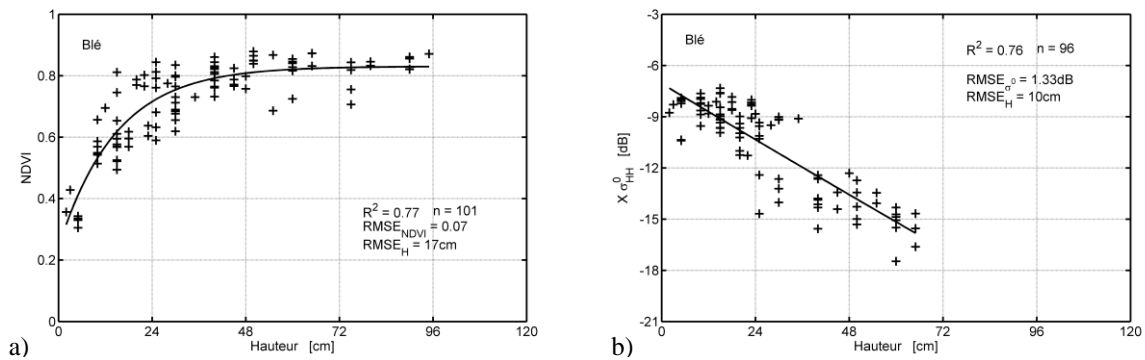


Figure 93 : Relations empiriques entre la hauteur du blé et les signaux satellites, *NDVI* a) et σ_{X-HH}^0 b).

Comme précédemment dans le cas du *LAI*, la Figure 94 présente un bilan des performances des données multi-fréquences pour le suivi de la hauteur des cultures pluviales d'hiver.

Concernant le **colza** (Figure 94a), les relations basées sur les coefficients de rétrodiffusion permettent une estimation de la hauteur, jusqu'aux valeurs maximales. A l'inverse, la relation s'appuyant sur le *NDVI* sature à des valeurs inférieures, proche de 130 cm. Cette dernière présente toutefois de meilleures performances statistiques, avec un coefficient de détermination de 0,91 et une erreur relative inférieure à 5%. Dans le cas des données micro-ondes, les rapports faisant intervenir cross- et co-polarisations en bande C présentent des coefficients de détermination maximum (0,76), proches des résultats obtenus avec la bande L (0,74). Les coefficients de rétrodiffusion acquis en bande X (avec la polarisation *HH*), et en bande C (avec la polarisation *VV*) sont également acceptables, avec des valeurs de R^2 excédant 0,55. Les erreurs associées à ces différentes relations sont inférieures à 15%.

Dans le cas du **blé** (Figure 94b), les relations basées sur les coefficients de rétrodiffusion acquis en bande X (avec la polarisation *HH*), et celles s'appuyant sur le *NDVI* présentent des performances statistiques proches. En bande C, les résultats obtenus avec la polarisation *VV* et le rapport de polarisation *VH/VV* présentent également des performances acceptables, avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,6 et des erreurs inférieures à 20%. Concernant les autres configurations, les résultats sont médiocres, avec des coefficients de rétrodiffusion inférieurs à 0,5, ou des erreurs importantes.

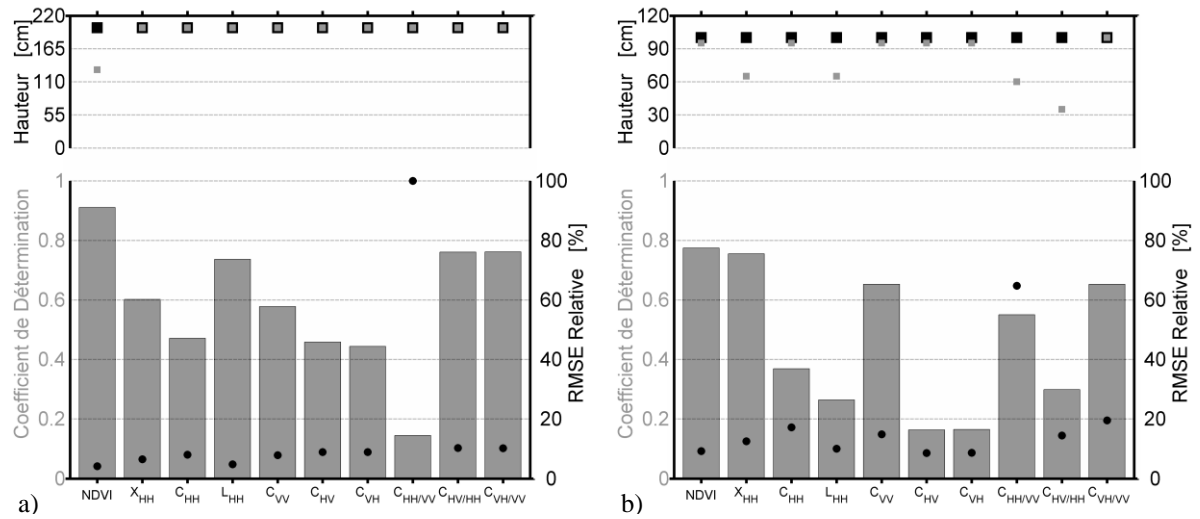


Figure 94 : Bilan des performances statistiques associées aux relations empiriques entre la hauteur du colza a) et du blé b), et les signaux satellites. Les valeurs maximales de hauteur, ainsi que le niveau de saturation, sont indiqués au-dessus des indicateurs statistiques, en noir et gris respectivement.

4.2. Estimation du LAI et de la hauteur des cultures irriguées d'été

Cas du LAI

Concernant le **maïs** et le **soja**, parmi les différentes possibilités offertes par les données micro-ondes, les meilleurs résultats sont offerts par la bande C, avec la polarisation *VH* (Figure 95). Pour ces deux cultures d'été, la sensibilité à l'indice foliaire est maximale pour les valeurs de *LAI* n'excédant pas $2 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ (environ 2,5 dB par unité de *LAI*). Les signaux radar saturent par la suite, la dynamique est alors de 2 dB, pour des valeurs de *LAI* allant de $2 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, aux valeurs maximales (soit 4 et 4,8 pour le maïs et le soja, respectivement). Concernant le **maïs**, la relation est associée à une importante dispersion, surtout durant les premiers stades phénologiques où la contribution du sol est importante (humidité, rugosité). Cette dispersion est moindre concernant la culture de **soja**. Cette différence entre les cultures s'explique d'une part, par le nombre de parcelles suivies (2 dans le cas du soja contre 8 pour le maïs), et par les différences de pratiques culturales entre exploitant (les parcelles de soja étant cultivées par le même exploitant, contrairement aux parcelles de maïs). Enfin, les estimations du *LAI* sont associées à une erreur de $0,60 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ et $0,73 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ pour le **maïs** et le **soja** respectivement.

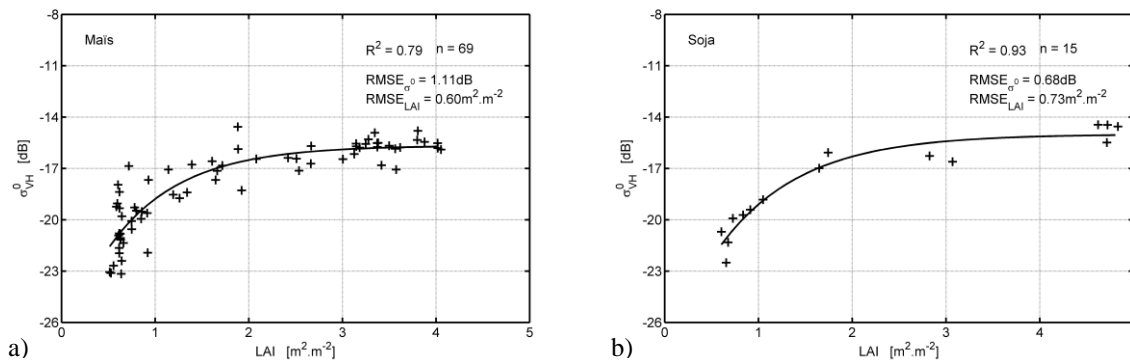


Figure 95 : Relations empiriques entre l'indice foliaire du maïs (a) et du soja (b), et les coefficients de rétrodiffusion, σ_{C-VH}^0 .

La Figure 96 présente un bilan des performances des données multi-fréquences pour le suivi de l'indice foliaire des cultures irriguées d'été.

Concernant le **maïs** (Figure 96a), les relations empiriques présentent des coefficients de détermination compris entre 0,23 et 0,79, avec des erreurs relatives inférieures à 20% (excepté dans le cas du rapport de co-polarisation, en bande C). Les meilleurs résultats sont obtenus par les relations basées sur les cross-polarisation, sur le rapport combinant *VH* et *VV*, et sur la polarisation *HH* en bande C. Les résultats en bande L sont prometteurs (R^2 de 0,73), toutefois les images sont acquises durant la phase de croissance, alors que les valeurs de *LAI* atteignent au maximum $1,57 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$.

Dans le cas du **soja** (Figure 96b), toutes les relations basées sur les données acquises en bande C sont associées à des coefficients de détermination supérieurs à 0,8, et à des erreurs inférieures à 20%. Les performances obtenues en bande L sont similaires, mais elles ne couvrent que les premiers stades de développement du couvert (caractérisés par un indice foliaire inférieur à $1 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$). A l'inverse, en bande C les relations sont valides jusqu'aux valeurs maximales de *LAI*, soit $4,83 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$.

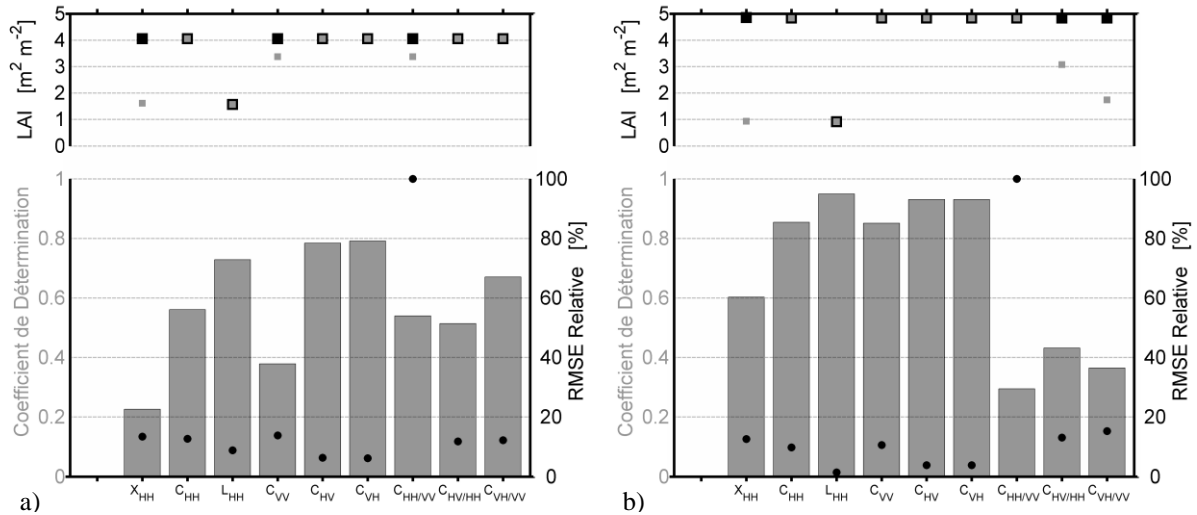


Figure 96 : Bilan des performances statistiques associées aux relations empiriques entre le LAI du maïs a) et du soja b), et les signaux satellites. Les valeurs maximales d'indice foliaire, ainsi que le niveau de saturation, sont indiqués au-dessus des indicateurs statistiques, en noir et gris respectivement.

Cas de la hauteur

Les relations obtenues entre les données satellites (optiques et radar), et la hauteur du **maïs** sont présentées sur la Figure 97. Ces relations sont associées à une importante dispersion. Dans le cas du *NDVI* (Figure 97a), cette dispersion est maximale pour les données de hauteur comprises entre 70 et 210 cm, durant la période de croissance. Concernant les données radar (Figure 97b), la dispersion est importante lors des premiers stades de développement de la végétation, alors que la hauteur est inférieure à 70 cm. Dans chacun des cas, la sensibilité diminue avec l'augmentation du paramètre. Avec un coefficient de détermination de 0,92 et une *RMSE* de 44 cm, les performances offertes par le *NDVI* pour le suivi de la hauteur sont meilleures que celles associées aux coefficients de rétrodiffusion ($R^2=0,70$ et *RMSE*=66cm).

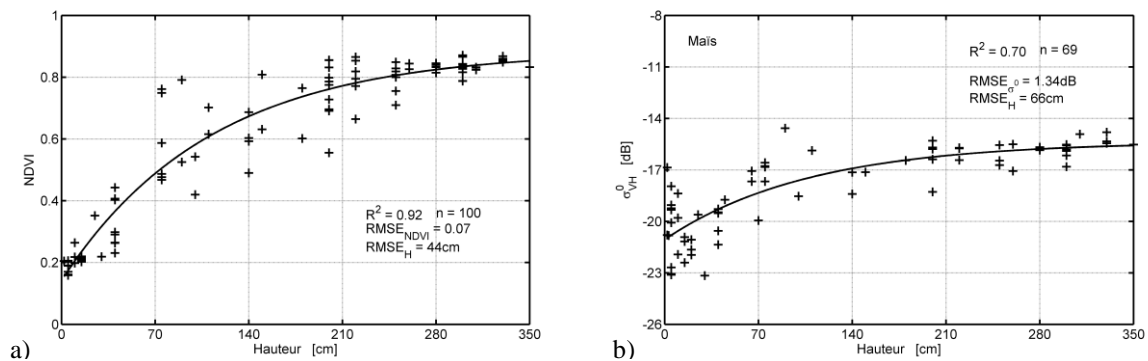


Figure 97 : Relations empiriques entre la hauteur du maïs et les signaux satellites, *NDVI* a) et σ^0_{C-VH} b).

La Figure 98 présente les relations établies entre la hauteur du **soja** et le *NDVI*, ou les coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C, avec la polarisation *VH*. Sur cette culture, les deux relations obtenues sont assez proches, du point de vue de l'allure générale et des performances statistiques. Les données satellites augmentent lorsque le couvert se développe. La sensibilité à la hauteur diminue légèrement, au cours du cycle

phénologique de la culture. Avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,9 et des $RMSE$ inférieures à 10 cm, ces deux relations sont adéquates pour le suivi de la hauteur du soja (pas d'impact de l'irrigation).

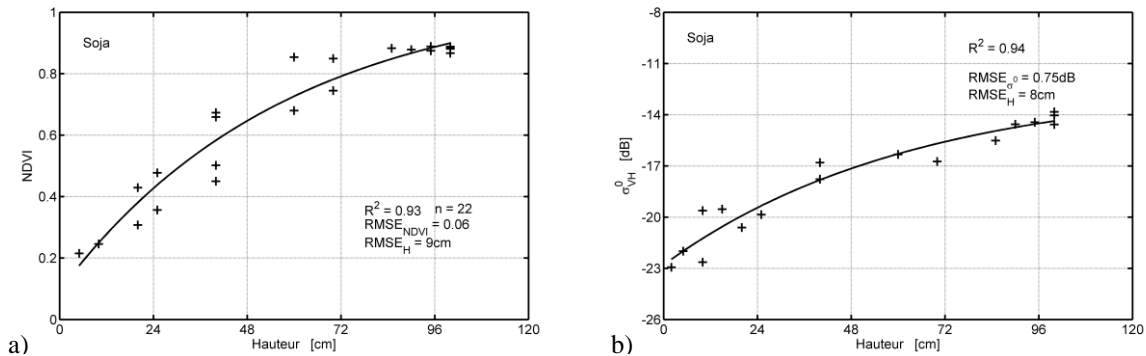


Figure 98 : Relations empiriques entre la hauteur du soja et les signaux satellites, NDVI a) et σ^0_{C-VH} b).

La Figure 99 présente un bilan des performances des données multi-fréquences pour le suivi de l'indice foliaire des cultures irriguées d'été.

Concernant le **maïs** (Figure 99a), les meilleurs résultats sont obtenus avec la relation basée sur le NDVI. Les performances associées aux cross-polarisations (HV ou VH) en bande C, et au rapport VH/VV sont également acceptables. Elles présentent des coefficients de rétrodiffusion supérieurs à 0,6, et une erreur similaire à celle obtenue avec les données acquises dans le visible (inférieure à 20%). Dans chacun des cas, la hauteur est suivie jusqu'aux valeurs maximales. Une nouvelle fois, les résultats en bande L sont intéressants. Avec 100 cm, la hauteur mesurée lors des acquisitions Alos est toutefois loin des valeurs maximales (350 cm)

Dans le cas du **soja** (Figure 99b), les relations basées sur une unique polarisation en bande C (HH , VV , HV ou VH) sont associées à des coefficients de détermination supérieurs à 0,8, et à des erreurs inférieures à 20%. Ces performances sont similaires à celles observées avec le NDVI. D'autre part, elles sont valides jusqu'aux valeurs maximales de hauteur du couvert. A l'inverse, les rapports de polarisation ou les données en bande X présentent des coefficients de déterminations inférieurs à 0,5, et des erreurs relatives importantes (surtout dans le cas du ratio entre les co-polarisations). Enfin, les résultats obtenus en bande L sont intéressants, cependant les données sont acquises alors que la hauteur maximale du soja atteint seulement 20 cm.

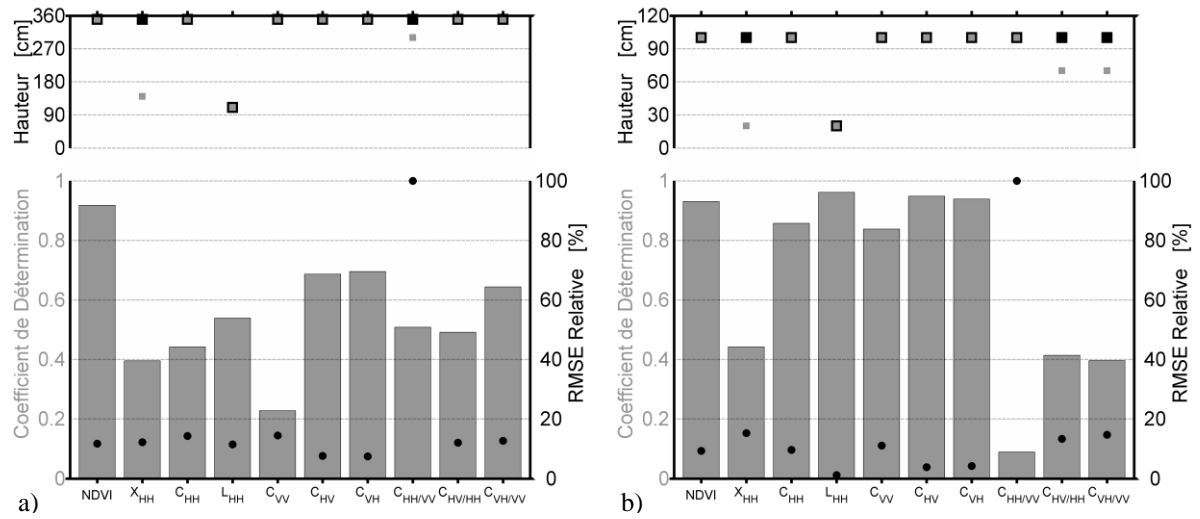


Figure 99 : Bilan des performances statistiques associées aux relations empiriques entre la hauteur du maïs a) et du soja b), et les signaux satellites. Les valeurs maximales de hauteur, ainsi que le niveau de saturation, sont indiqués au-dessus des indicateurs statistiques, en noir et gris respectivement.

4.3. Estimation du LAI et de la hauteur d'une culture pluviale d'été

Cas du LAI

La Figure 100 présente la relation entre l'indice foliaire du tournesol et les coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C, en polarisation HH . Une dynamique totale de 6 dB est observée durant la période végétative, alors que les valeurs de LAI passent de 0,6 à 3,7 $m^2.m^{-2}$. La sensibilité des coefficients de rétrodiffusion à l'indice foliaire diminue légèrement avec l'augmentation du paramètre. Elle est proche de 2,5 dB par unité de LAI , pour les valeurs inférieures à 2 $m^2.m^{-2}$, au-delà elle est inférieure à 1 dB par unité de LAI . Avec un coefficient de détermination égal à 0,82, cette relation permet d'estimer le LAI du tournesol avec une erreur quadratique moyenne de 0,49 $m^2.m^{-2}$.

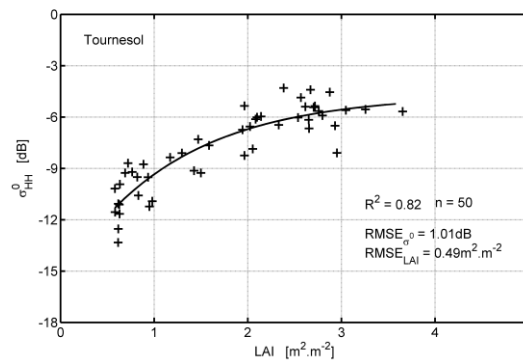


Figure 100 : Relations empiriques entre l'indice foliaire du tournesol, et les coefficients de rétrodiffusion, σ_{C-HH}^0 .

La Figure 101 présente un bilan des performances des données multi-fréquences pour le suivi de l'indice foliaire, concernant la culture de tournesol. Quelle que soit la configuration, les relations empiriques prenant en compte une seule polarisation présentent des résultats acceptables, avec des coefficients de détermination compris entre 0,60 et 0,89, et une erreur relative inférieure à 20%. Les meilleurs résultats sont obtenus avec les acquisitions satellites réalisées en bande L (en polarisation HH). Il est à noter que ces données couvrent les premiers stades phénologiques du tournesol, jusqu'à des valeurs de LAI proches de 2,4 $m^2.m^{-2}$. En bande C, les différentes polarisations sont associées à des résultats assez proches, les co-polarisations présentant des coefficients de détermination supérieurs aux cross-polarisations (et inversement concernant les erreurs). Enfin, concernant la bande X, les meilleures performances (avec un R^2 de 0,60 et une erreur comparable aux autres fréquences) sont obtenues durant les premiers stades de développement de la culture, avant que le LAI n'atteigne les valeurs maximales (soit une saturation à 2,5 $m^2.m^{-2}$ contre 3,7 $m^2.m^{-2}$ au maximum).

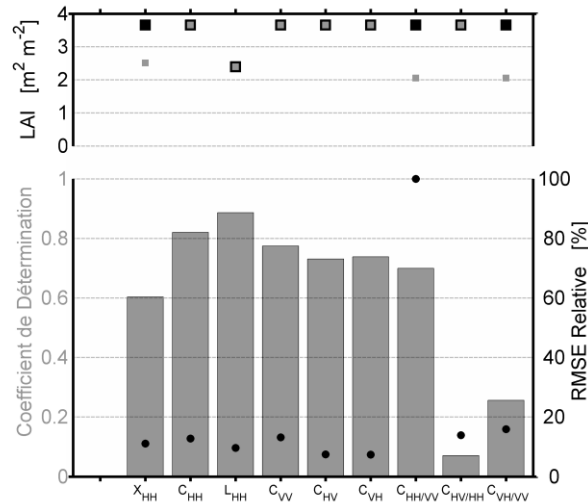


Figure 101 : Bilan des performances statistiques associées aux relations empiriques entre le LAI du tournesol, et les signaux satellites. Les valeurs maximales d'indice foliaire, ainsi que le niveau de saturation, sont indiqués au-dessus des indicateurs statistiques, en noir et gris respectivement.

Cas de la hauteur

La Figure 102 présente les relations obtenues entre la hauteur du tournesol et les données satellites (*NDVI* et coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C, avec la polarisation *HH*). Sur cette culture, les meilleurs résultats sont associés aux données optiques, avec un coefficient de détermination de 0,93 et une erreur de 22 cm sur l'estimation de la hauteur. Concernant les données radar, la dispersion est importante : *i*) pour les hauteurs inférieures à 40 cm, et *ii*) pour les hauteurs maximales (alors que le capitule se met en place sur certaines parcelles). Le coefficient de détermination est alors inférieur à celui observé dans l'optique (0,75), et l'erreur sur la hauteur supérieure (43 cm).

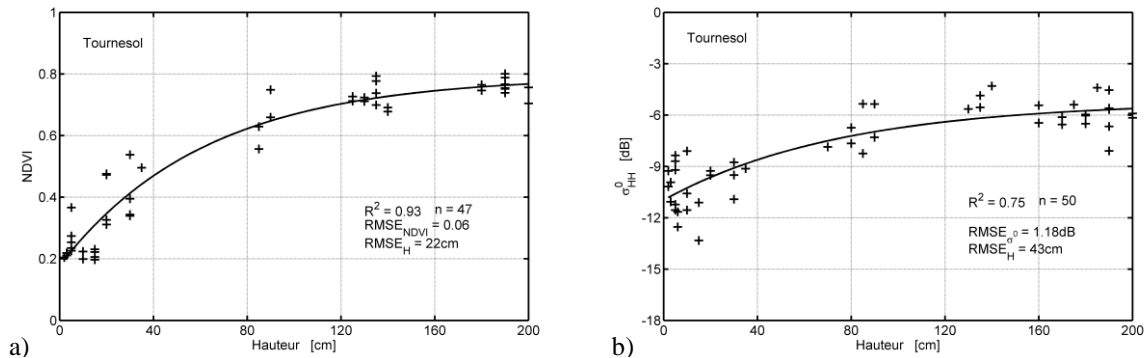


Figure 102 : Relations empiriques entre la hauteur du tournesol et les signaux satellites, *NDVI* (a) et σ^0_{C-HH} (b).

La Figure 103 présente un bilan des performances des données multi-fréquences pour le suivi de la hauteur concernant la culture de tournesol. Les performances statistiques obtenues en bande L sont similaires aux meilleurs résultats associés au *NDVI*. Toutefois, ces acquisitions ne couvrent que la première moitié du cycle cultural, où la hauteur n'excède pas 120 cm. En bande C, les différentes polarisations présentent des coefficients de détermination compris entre 0,65 et 0,76, et des erreurs inférieures à 15%. Enfin, la bande X présente des

résultats acceptables (avec un R^2 supérieur à 0,50 et une erreur comparable aux autres fréquences), pour des couverts n'excédant pas 140 cm.

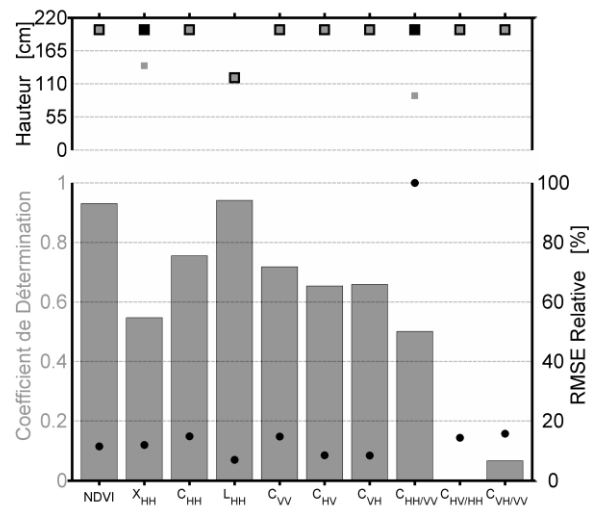


Figure 103 : Bilan des performances statistiques associées aux relations empiriques entre la hauteur du tournesol, et les signaux satellites. Les valeurs maximales de hauteur, ainsi que le niveau de saturation, sont indiqués au-dessus des indicateurs statistiques, en noir et gris respectivement.

5. CONCLUSION

Ce chapitre traite de la sensibilité des données micro-ondes (en se focalisant sur les aspects fréquence et polarisation) pendant le cycle phénologique des principales cultures de la zone d'étude (blé, colza, maïs, tournesol, et soja). Les analyses sont basées sur les séries d'images acquises entre le semis et la récolte, par les satellites TerraSAR-X, Radarsat-2 et Alos pour le radar, et Formosat-2 et Spot-4/5, pour l'optique. Les signatures temporelles sont tout d'abord analysées, après correction angulaire (en bandes X et C) basée sur l'utilisation conjointe des données radar et optiques (*NDVI*). La sensibilité des signaux satellites vis-à-vis des paramètres des cultures est ensuite analysée, en considérant l'indice foliaire (dérivé des images optiques), et la hauteur des cultures (observée lors des acquisitions). Les influences des conditions du sol (rugosité et humidité) sont abordées tout au long du cycle de culture.

La correction angulaire tire profit des séries satellites (acquises dans les domaines optiques et micro-ondes) afin de sélectionner des paires d'images maximisant l'effet des angles d'incidence entre les acquisitions les plus proches, tout en réduisant l'effet des changements des conditions de sol. La normalisation angulaire de signaux radar montre qu'il est important de normaliser le signal radar pour les valeurs de *NDVI* faibles ($< 0,4$), en particulier pour les signaux co-polarisés acquis en bande C. Les coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C, en polarisations *HH* ou *VV*, montrent une sensibilité angulaire qui varie entre $0,1 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$ (lorsque le *NDVI* est proche de $0,4$) et $0,3 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$ sur sol nu (lorsque le *NDVI* est proche de $0,2$). Concernant les coefficients de rétrodiffusion acquis en bande C, en polarisation croisée, ou en bande X, une sensibilité angulaire plus faible est observée pour les faibles valeurs de *NDVI*. Elle est comprise entre $0,08$ et $0,18 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$. Quelles que soient les configurations radar considérées, la sensibilité angulaire est inférieure à $0,1 \text{ dB} \cdot ^\circ^{-1}$, pour les fortes valeurs de *NDVI* (supérieures à $0,4$).

Les analyses des séries temporelles optiques et radar (affranchies de la dépendance angulaire) montrent : *i*) une forte complémentarité de l'approche multi-capteurs/multi-spectrales durant le cycle phénologique, et *ii*) des comportements spécifiques des coefficients de rétrodiffusion vis-à-vis des cultures considérées. Pour chacun des couverts étudiés, au minimum une configuration radar peut être retenue afin de suivre les évolutions du couvert. Dans le cas du blé, outre l'étude du rapport de co-polarisation des coefficients de rétrodiffusion en bande C (*HH/VV*), il apparaît clairement que les signaux acquis en bande X, avec la polarisation *HH* offrent de grandes perspectives pour le suivi de cette culture. La meilleure configuration radar pour le suivi du colza et du maïs est la bande C, en cross-polarisation. Enfin le tournesol et le soja sont associés à de fortes dynamiques, quelle que soit la polarisation considérée en bande C. L'analyse des séries temporelles montre également que certains stades phénologiques sont clairement identifiables (le développement des tiges, la floraison, la fructification, la sénescence, la récolte, les événements de verse...).

Les coefficients de rétrodiffusion sont finalement confrontés à deux paramètres liés aux cultures, à savoir l'indice foliaire et la hauteur. Chacun des paramètres peut être estimé jusqu'aux valeurs maximales observées, les performances étant fonctions de la culture considérée. Les meilleures possibilités de suivi de la végétation sont associées aux cultures de soja et de tournesol, en utilisant respectivement des coefficients de rétrodiffusion

σ_{C-VH}^0 et σ_{C-HH}^0 ($R^2 > 0,75$). Elles sont plus limitées dans le cas du maïs (σ_{C-VH}^0), ou des cultures d'hiver (σ_{X-HH}^0 pour le blé et $\sigma_{C-VH/HH}^0$ pour le colza), mais restent toutefois acceptables ($R^2 > 0,64$). Les signaux en bande L (polarisation HH) offrent des perspectives très intéressantes pour l'estimation de la hauteur du tournesol, du soja, du colza, et pour l'estimation du LAI du soja et colza ($R^2 > 0,70$). De plus, les données radar présentent une alternative à l'optique pour l'estimation de la hauteur, plus particulièrement concernant les cultures de blé, de soja et de tournesol.

L'ensemble des résultats de ce chapitre montre que les données micro-ondes offrent une alternative judicieuse en complément ou remplacement des données optiques.

CHAPITRE III : Evaluation et amélioration des modèles de rétrodiffusion radar de sol nu

1. INTRODUCTION

Les modèles de rétrodiffusion radar de sol nu visent à restituer au mieux les interactions entre l'onde électromagnétique et la surface. Leur mise en œuvre a pour objectif d'apporter une aide à la compréhension des processus régissant la rétrodiffusion, condition nécessaire pour l'interprétation des images micro-ondes et l'inversion physique des paramètres du sol (humidité, texture, rugosité...). L'utilisation de modèles de rétrodiffusion, pour l'étude d'une région agricole, passe par l'identification d'une approche reproduisant avec fidélité les signaux radar, tout en conciliant les contraintes du paysage et celles inhérentes à la télédétection satellitaire (grande surface analysée et conditions de surface très contrastées).

Dans ce contexte, les approches basées sur la résolution exacte des équations de Maxwell (ou modèles exacts) ne constituent pas une réponse applicable à l'échelle d'une région agricole. En effet, ces méthodes dites méthodes des moments (*MoM*) ou de différences finies dans le domaine temporel (*FDTD*) nécessitent des temps de calcul élevés, et s'appuient sur un nombre important de paramètres d'entrée (difficiles à renseigner à large échelle) (Besse, 2004; Kane, 1966). A l'inverse, les modèles approchés ainsi que les modèles semi-empiriques offrent alors une alternative, avec comme caractéristique commune un nombre limité de paramètre d'entrée.

Les modèles qualifiés d'approchés reposent sur une description physique des processus. Les plus couramment utilisés sont : le modèle des petites perturbations (*SPM*), le modèle de Kirchhoff, qui est décliné en deux approximations selon le niveau de rugosité (optique géométrique pour les faibles rugosités, et optique physique pour les fortes), et le modèle *IEM* (Integral Equation Model) (Ulaby et al., 1982). Ce dernier, proposé par Fung et al., 1992, offre un domaine de validité plus étendu vis-à-vis des paramètres de rugosité, expliquant son succès dans la communauté scientifique. Néanmoins, les caractéristiques des milieux agricoles, avec des niveaux de rugosité importants, limitent les possibilités d'application du modèle. Parmi les travaux basés sur le modèle *IEM*, certains auteurs proposent une simplification du modèle en s'affranchissant d'un des deux paramètres relatifs à la rugosité : la longueur de corrélation (Baghdadi et al., 2011a; Baghdadi et al., 2004; Baghdadi et al., 2006; Baghdadi et al., 2002; Baghdadi et al., 2011b; Zribi and Dechambre, 2002), qui s'accompagne d'une réduction de la dispersion vis-à-vis des estimations des coefficients de rétrodiffusion.

Concernant les modèles semi-empiriques, ils présentent comme principal avantage un formalisme simple, facilitant leur mise en œuvre, au détriment de l'approche physique des phénomènes. Différents auteurs ont ainsi proposés des modèles (Dubois et al., 1995; Oh, 2004; Oh et al., 1992), en s'appuyant sur l'analyse statistique d'une ou plusieurs bases de données. Dans ces approches, la dépendance du formalisme aux conditions de surface observées au cours des campagnes expérimentales est généralement forte. L'application à de nouvelles zones d'étude nécessite une étape d'évaluation des performances, surtout dans le cas où les conditions de surface sont différentes de celles observées lors de la mise en œuvre des modèles. Ces modèles n'ont pas connu de réelles modifications au cours des 20 dernières années.

L'objectif de ce chapitre est tout d'abord de tester les performances des modèles (physique et semi-empirique) les plus couramment utilisés en télédétection, sur la base des données acquises pendant la campagne expérimentale *MCM'10*. Les fortes plus-values reposent sur les acquisitions radar effectuées en bandes X, C et L, et sur les forts contrastes des conditions de sol échantillonnés (Chapitre I). Cette évaluation n'a jamais été réalisée au cours des 20 dernières années sur un même ensemble cohérent de données de terrain (similarité entre les protocoles de mesures, les sites d'études, la climatologie...).

La seconde partie de ce chapitre consiste à mettre en place une méthode d'amélioration des modèles empiriques, sur la base de l'analyse des résidus de modélisation, en lien avec les paramètres de l'antenne (angle de visée, fréquence, polarisation) et de la surface (rugosité, humidité, texture). Cette étape vise également à étendre les domaines de validité des différents modèles considérés, aux conditions contrastées observées au sein de la zone d'étude (Chapitre I). La méthode est développée sur un ensemble de données, puis évaluée sur un autre ensemble de données indépendant.

Ces deux étapes (évaluation et comparaison des performances, puis amélioration des modèles) sont nécessaires avant d'intégrer un ou plusieurs modèles dans des schémas d'inversion des paramètres de surface (afin d'estimer l'humidité et la rugosité de surface). D'autre part, ces analyses permettent d'envisager la mise en place d'un nouveau modèle empirique, synthèse des études précédentes.

2. DESCRIPTION DES MODELES DE RETRODIFFUSION

Les modèles de rétrodiffusion radar sol nu mis en œuvre dans ces travaux de thèse appartiennent à deux grandes familles, à savoir : semi-empirique et physique. Dans l'approche semi-empirique, le formalisme simple est dérivé d'analyses statistiques d'une base de données. Les modèles sont par conséquent inféodés à l'exhaustivité des mesures, et présentent théoriquement des limites concernant les possibilités d'application sur d'autres sites. Concernant l'approche physique, le formalisme est dérivé de différentes lois physiques, et par conséquent indépendant d'une base de données. Les modèles sont théoriquement applicables sur un large panel de conditions, en respectant les limites des hypothèses sur lesquelles ils reposent.

2.1. Modèles semi-empiriques

2.1.1. Le modèle d'Oh et al., 1992

Le modèle proposé par Oh et al., 1992 est basé sur les relations qui permettent de calculer les coefficients de rétrodiffusion en polarisation HH , VV et HV à partir des rapports de polarisation, dénotés p et q , des caractéristiques du capteur et des paramètres de surface (Equations 29-36).

$$\sigma_{HH}^0 = g \sqrt{p} \cos^3 \theta [\Gamma_V(\theta) + \Gamma_H(\theta)] \quad \text{Équation 29}$$

$$\sigma_{VV}^0 = \frac{g \cos^3 \theta}{\sqrt{p}} [\Gamma_V(\theta) + \Gamma_H(\theta)] \quad \text{Équation 30}$$

$$\sigma_{HV}^0 = q \sigma_{VV}^0 \quad \text{Équation 31}$$

$$\text{avec } g = 0,7 [1 - \exp(-0,65(kh_{rms})^{1,8})]$$

Le rapport p renvoie aux co-polarisations ($\sigma_{HH/VV}^0$), alors que le rapport q prend en compte co- et cross-polarisations ($\sigma_{HV/VV}^0$). Les coefficients de rétrodiffusion sont ainsi reliés à l'angle d'incidence (θ), au nombre d'onde (k), à la hauteur quadratique moyenne (h_{rms}), à la réflexion de Fresnel de la surface au nadir (Γ_0), par des expressions non linéaires.

$$q = \sigma_{HV/VV}^0 = 0,23 \sqrt{\Gamma_0} [1 - \exp^{-kh_{rms}}] \quad \text{Équation 32}$$

$$p = \sigma_{HH/VV}^0 = [1 - \left(\frac{\theta}{90^\circ}\right)^2]^{1/3} \Gamma_0 \exp^{-kh_{rms}} \quad \text{Équation 33}$$

Concernant les coefficients de Fresnel (Γ_0 , Γ_H et Γ_V), ils sont déduits des valeurs de constante diélectrique du sol (ϵ_r) (Equations 34-36). Ces dernières sont dérivées des données d'humidité de surface et de texture (teneurs en argile, limon et sable), sur la base des relations décrites par Hallikainen et al., 1985.

$$\Gamma_0 = \left[\frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \right]^2 \quad \text{Équation 34}$$

$$\Gamma_H = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{(\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta})^2} \quad \text{Équation 35}$$

$$\Gamma_V = \frac{\epsilon \cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{(\epsilon \cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta})^2} \quad \text{Équation 36}$$

Ces relations ont été établies, de manière empirique, à partir d'une base de données présentant un large panel de configuration radar. Les acquisitions micro-ondes ont été effectuées à l'aide de diffusiomètres, à des

fréquences de fonctionnement appartenant aux bandes L (1,5 GHz), C (4,75 GHz) et X (9,5 GHz). Les mesures ont été acquises à des angles d'incidence compris entre 10° et 70°, en co-, et cross-polarisation.

Les paramètres de surface couvrent également une importante gamme de conditions. Les valeurs de h_{rms} varient entre 0,32 et 3,02 cm (avec des longueurs de corrélation comprises entre 8,4 et 9,9 cm). Elles sont dérivées des profils de rugosité d'un mètre de longueur, acquis à l'aide d'un rugosimètre laser (dont les résolutions horizontales et verticales sont respectivement de 1 et 2 mm), et de profils « papiers » de 3 mètres (pour le suivi de la rugosité à large échelle). L'humidité de surface du sol est comprise entre 9 et 31%. Elle est estimée à partir des mesures de constante diélectrique (uniquement la partie réelle), sur la base des travaux d'Hallikainen et al., 1985. Ces mesures de constante diélectriques sont collectées en surface, et à une profondeur de 4 cm (donnant une valeur moyenne de l'horizon supérieur 0-4 cm).

L'intervalle de variation des données conditionne le domaine de validité du modèle. Dans l'étude, les auteurs définissent des gammes de paramètres, pour lesquels les résultats du modèle sont optimaux. Ces intervalles sont présentés dans le Tableau 6. Concernant le paramètre de rugosité, l'étendue du domaine de validité est fonction du nombre d'onde (k), et donc de la fréquence considérée. Dans le tableau, les équivalences entre la valeur de kh_{rms} (proposée par l'auteur) et h_{rms} en bandes X, C et L sont également fournies ($X-h_{rms}$, $C-h_{rms}$, $L-h_{rms}$ correspondant respectivement aux données TerraSAR-X, Radarsat-2 et Alos).

Modèle	kh_{rms} [cm]		$X-h_{rms}$ [cm]		$C-h_{rms}$ [cm]		$L-h_{rms}$ [cm]		Humidité [%]		Ang Inc [°]	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Oh1992	0,10	6,00	0,05	2,97	0,09	5,31	0,38	22,56	9,0	31,0	10,0	70,0

Tableau 6 : Domaine de validité du modèle d'Oh 1992.

2.1.2. Le modèle d'Oh et al., 2004

Dans ces travaux de 2004, Oh propose une variante dans l'expression des rapports de polarisation, permettant de s'affranchir de la relation d'Hallikainen et al., 1985 (et par conséquent des données de texture), et de la réflexion de Fresnel. Le rapport p (référant aux co-polarisations) est alors fonction de l'angle d'incidence (θ), du nombre d'onde (k), de la hauteur quadratique moyenne (h_{rms}) et de l'humidité de surface (m_v), au même titre que la polarisation croisée. Sur la base d'un jeu de données plus riche qu'en 1992, les auteurs montrent que l'expression du rapport q (prenant en compte co- et cross-polarisations) est indépendante de l'humidité de surface (Oh et al., 2002).

$$p = \sigma_{HH}^0 / \sigma_{VV}^0 = 1 - \left(\frac{\theta}{90^\circ} \right)^{0,35 m_v^{-0,65}} \times \exp^{-0,4(kh_{rms})^{1,4}} \quad \text{Équation 37}$$

$$q = \sigma_{HV}^0 / \sigma_{VH}^0 = 0,095(0,13 + \sin 1,5\theta)^{1,4} (1 - \exp^{-1,3(kh_{rms})^{0,9}}) \quad \text{Équation 38}$$

Les coefficients de rétrodiffusion sont ensuite calculés selon les relations suivantes :

$$\sigma_{HV}^0 = 0,11 m_v^{0,7} \cos^2 2\theta (1 - \exp^{-0,32(kh_{rms})^{1,8}}) \quad \text{Équation 39}$$

$$\sigma_{VV}^0 = \frac{\sigma_{HH}^0}{q} \quad \text{Équation 40}$$

$$\sigma_{HH}^0 = p \sigma_{VV}^0 \quad \text{Équation 41}$$

Les mesures radar nécessaires à la mise en place de ce modèle ont été réalisées sur une large variété de conditions de surface, à l'aide d'antennes au sol (diffusiomètres), et associées à celles issues de capteurs SAR

aéroportés. Les données micro-ondes ont été effectuées à des fréquences comprises entre 1,25 et 9,6 GHz, des angles d'incidence entre 10 à 70°, en co-, et cross-polarisation. Concernant les paramètres de surface, les valeurs de h_{rms} varient entre 0,55 et 3,47 cm (avec des longueurs de corrélation comprises entre 6,9 et 11,0 cm). Comme précédemment, elles sont estimées à partir de profils d'un mètre (réalisés à l'aide d'un rugosimètre laser), et de profils « papiers » de 3,5 mètres. Les valeurs d'humidité de surface concernent les trois premiers centimètres du sol, elles sont comprises entre 4,3 et 29,1%. Ces valeurs sont déduites des mesures de constante diélectrique, acquises à des profondeurs variables selon les campagnes expérimentales (allant de la surface à 6 cm).

Comme précédemment, ces bases de données conditionnent le domaine de validité du modèle (Tableau 7). Les limites sont sensiblement similaires à celles observées dans le cas de la version de 1992. Les principales différences concernent la valeur supérieure de hauteur quadratique moyenne (kh_{rms} passe de 6,00 à 6,98 cm), et la limite inférieure d'humidité de surface (qui passe de 9 à 4%).

Modèle	kh _{rms} [cm]		X-h _{rms} [cm]		C-h _{rms} [cm]		L-h _{rms} [cm]		Humidité [%]		Ang Inc [°]	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Oh2004	0,13	6,98	0,06	3,45	0,11	6,17	0,49	26,24	4,0	29,1	10,0	70,0

Tableau 7 : Domaine de validité du modèle d'Oh 2004.

2.1.3. Le modèle de Dubois et al., 1995

Dubois et al., 1995 présentent un modèle empirique décrivant les comportements des coefficients de rétrodiffusion co-polarisés (σ_{HH}^0 et σ_{VV}^0) sur sol nu (Equation 42-43). A la différence des modèles d'Oh, les relations proposées ne concernent pas les rapports de polarisation, ni les coefficients de rétrodiffusion acquis en polarisation croisée. Dans ces travaux, les signaux micro-ondes sont fonction des caractéristiques des capteurs, à savoir de l'angle d'incidence (θ), du nombre d'onde (k) et de la longueur d'onde (λ), et des paramètres du sol, la hauteur quadratique moyenne (h_{rms}) et la constante diélectrique (ϵ_r). Cette dernière peut être déterminée sur la base des travaux d'Hallikainen et al., 1985, à partir de l'humidité de surface et de la texture du sol (comme pour le modèle d'Oh 1992).

$$\sigma_{HH}^0 = 10^{-2,75} \frac{\cos^{1,5}\theta}{\sin^5\theta} 10^{0,028} \epsilon_r \tan\theta (kh_{rms} \sin\theta)^{1,4} \lambda^{0,7} \quad \text{Equation 42}$$

$$\sigma_{VV}^0 = 10^{-2,35} \frac{\cos^3\theta}{\sin^3\theta} 10^{0,046} \epsilon_r \tan\theta (kh_{rms} \sin\theta)^{1,1} \lambda^{0,7} \quad \text{Equation 43}$$

Ces relations ont été établies en combinant deux bases de données, décrites par Oh et al., 1992 (servant à la mise en place du modèle) et par Wegmuller et al., 1994. Les mesures micro-ondes, acquises par des antennes (diffusiomètres), couvrent l'intervalle 1,5 à 11 GHz pour des états de co-polarisation linéaires (HH et VV). Elles ont été acquises à des angles d'incidence allant de 10 à 70° dans un cas, et de 30 à 60° dans l'autre (intervalle de 10° dans les 2 cas). Concernant les paramètres de surface, les données retenues pour la mise en place du modèle présentent les limites suivantes : 0,32 et 3,02 cm pour la hauteur quadratique moyenne, et 17 et 31% pour l'humidité de surface. Les valeurs de rugosité sont déduites des profils réalisés à l'aide d'un rugosimètre laser. Concernant l'humidité de surface, les mesures sont collectées à l'aide de sonde délivrant la constante

diélectrique (Oh et al., 1992), ou par des mesures gravimétriques (Wegmuller et al., 1994). Dans chacun des cas, elles caractérisent l'horizon supérieur, à savoir 0-4 cm.

Le domaine de validité de ce modèle est restreint par l'auteur aux conditions présentées dans le Tableau 8. Comparé aux modèles proposés par Oh, les possibilités d'application sont plus restreintes vis-à-vis des conditions de rugosité (avec des valeurs de kh_{rms} inférieures à 2,50 cm), et d'angle d'incidence (supérieures à 30°).

Modèle	kh_{rms} [cm]		$X-h_{rms}$ [cm]		$C-h_{rms}$ [cm]		$L-h_{rms}$ [cm]		Humidité [%]		Ang Inc [°]	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Dubois	-	2,50	-	1,24	-	2,21	-	9,40	-	35	30,0	-

Tableau 8 : Domaine de validité du modèle de Dubois.

Les modèles semi-empiriques sont mis en place sur des bases de données où les paramètres de rugosité sont dérivés des profils lasers et « papiers » (respectivement d'1 et 3 mètres), et sur des mesures de constante diélectrique du sol (servant à l'estimation de l'humidité de surface), réalisées à différentes profondeurs (entre 0 et 6 cm). Les protocoles servant à la collecte des mesures terrains sont par conséquent différents de ceux mis œuvres durant la campagne expérimentale *MCM'10*, au même titre que les intervalles de variations (Chapitre I, section 4).

2.2. Modèle physique

2.2.1. Integral Equation Model

Le modèle *IEM* (Integral Equation Model) est un modèle développé par Fung et al., 1992. Il a pour but de modéliser le signal rétrodiffusé par le sol en tenant compte de différents paramètres d'influence, à savoir la fréquence, l'angle d'incidence et l'état de polarisation pour les caractéristiques relatives au capteur, et la rugosité de surface, la texture du sol et l'humidité pour les caractéristiques de la scène.

Le modèle est basé sur les équations électromagnétiques de Maxwell. Le coefficient de rétrodiffusion σ^0 s'écrit :

$$\sigma_{qp}^0 = \sigma_{qp}^S + \sigma_{qp}^M \quad \text{Équation 44}$$

Avec σ_{qp}^S qui correspond au premier ordre de la diffusion, et σ_{qp}^M aux réflexions multiples lors de l'interaction de l'onde avec le sol. Les lettres p et q représentent l'état de polarisation (H ou V).

Plus précisément pour les co-polarisations HH et VV , il prend la forme suivante :

$$\sigma_{pp}^0 = \frac{k^2}{2} |f_{pp}|^2 \exp^{-4k^2 h_{rms}^2 \cos^2 \theta} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(4k^2 h_{rms}^2 \cos^2 \theta)^n}{n!} W^{(n)}(2k \sin \theta, 0)$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{k^2}{2} R(f_{pp}^* F_{pp}) \exp^{-3k^2 h_{rms}^2 \cos^2 \theta} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(4k^2 h_{rms}^2 \cos^2 \theta)^n}{n!} W^{(n)}(2k \sin \theta, 0) \\
 & + \frac{k^2}{8} |F_{pp}|^2 \exp^{-3k^2 h_{rms}^2 \cos^2 \theta} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(k^2 h_{rms}^2 \cos^2 \theta)^n}{n!} W^{(n)}(2k \sin \theta, 0)
 \end{aligned} \tag{Equation 45}$$

Outre les termes incluant le nombre d'onde (k), la hauteur quadratique moyenne (h_{rms}) et l'angle d'incidence (θ), on retrouve certaines fonctions particulières associées au modèle physique de l'IEM : f_{qp} est le coefficient de diffusion simple (indépendant de la rugosité (Fung et al., 1992)), F_{qp} est le terme qui rend compte des diffusions multiples avec le sol. Ces deux paramètres sont fonction des coefficients de Fresnel dont l'expression varie selon l'état de polarisation considéré.

La transformée de Fourier à l'ordre n ($W^{(n)}$) est donnée par l'équation 46 à l'intérieur de laquelle la fonction d'auto-corrélation (L_c) est définie par $\rho(x)$. Cette dernière ayant pour expression $\rho(x) = \exp(-x/L_c)$ si L_c est de type exponentiel, et pour expression $\rho(x) = \exp(-(x/L_c)^2)$ si L_c est de type gaussien (Chapitre I, section 4.2).

$$W^{(n)} = \frac{1}{2\pi} \iint \rho^n(x, y) \exp^{-i(ax+by)} dx dy \tag{Equation 46}$$

La Figure 104 présente le domaine de validité du modèle *IEM*, en fonction des paramètres relatifs à la rugosité (kh_{rms} et kL_c). L'application du modèle est limitée par Fung et al., 1992 à des valeurs de kh_{rms} de 3 cm au maximum. Pour les valeurs de kL_c inférieures à 10 cm, la hauteur quadratique moyenne est inférieure varie entre 0 et 3 cm.

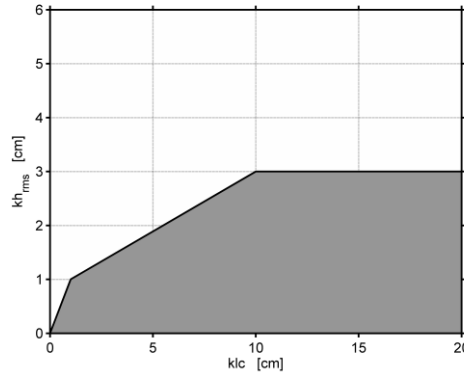


Figure 104 : Domaine de validité du modèle *IEM*, en fonction des paramètres relatifs à la rugosité (kh_{rms} et kL_c).

2.2.2. Calibration semi-empirique du modèle *IEM*

Différentes études présentées par Baghdadi (Baghdadi et al., 2002; Baghdadi et al., 2004; Baghdadi et al., 2006; Baghdadi et al., 2011a; Baghdadi et al., 2011b) proposent une calibration semi-empirique du modèle *IEM* (abrégé *IEM_{OPT}*). Elles visent à améliorer les estimations des coefficients de rétrodiffusion, en période de sol nu, sur les surfaces agricoles. La méthode mise en œuvre consiste à remplacer un des paramètres d'entrée du modèle, à savoir : la longueur de corrélation, L_c (variable difficile à collecter correctement sur le terrain), par un

paramètre de calibration, L_{opt} . Ce dernier est estimé pour différentes fonctions d'auto-corrélation, en s'appuyant sur la hauteur quadratique moyenne et l'angle d'incidence. Au final, les estimations du paramètre retenues sont basées sur une fonction d'auto-corrélation de type gaussien. Les relations proposées sont fonction de la polarisation et de la fréquence considérée.

Dans le cas de la bande C, les relations suivantes sont proposées :

$$L_{opt\ C-HH} = 0,162 + 3,006 \times h_{rms}(\sin(1,23\theta))^{-1,494} \quad \text{Équation 47}$$

$$L_{opt\ C-VV} = 1,281 + 0,134 \times h_{rms}(\sin(0,19\theta))^{-1,59} \quad \text{Équation 48}$$

$$L_{opt\ C-HV} = 0,9157 + 1,2289 \times h_{rms}(\sin(0,1543\theta))^{-0,3139} \quad \text{Équation 49}$$

Dans le cas de la bande X, les relations suivantes sont proposées :

$$L_{opt\ X-HH} = 18,102 \times \exp^{-0,033\theta} \times h_{rms}^{0,7644 \times \exp 0,0035\theta} \quad \text{Équation 50}$$

$$L_{opt\ X-VV} = 18,075 \times \exp^{-0,0379\theta} \times h_{rms}^{1,2594 \times \exp -0,0145\theta} \quad \text{Équation 51}$$

2.3. Sensibilité des modèles

Les modèles de rétrodiffusion radar proposés par Oh, Dubois et Fung (décrits les sections précédentes) reposent sur des formalismes spécifiques. A l'exception du modèle d'Oh 2004, ils sont basés sur les mêmes variables d'entrée, à savoir : la longueur d'onde et l'angle d'incidence, pour les paramètres propres au capteur, et l'humidité, la rugosité et la texture pour les paramètres décrivant la surface. Dans la version d'Oh 2004, l'auteur s'affranchit de l'étape de simulation de la constante diélectrique (par l'intermédiaire de la relation d'Halikainen), l'humidité de surface est alors prise en compte directement. Une autre différence porte sur la variable rugosité. Dans les approches semi-empiriques, seule la hauteur quadratique moyenne est considérée. A ce paramètre s'ajoute la longueur de corrélation, pour la description du microrelief de surface, concernant le modèle *IEM*.

Avant d'évaluer les modèles de rétrodiffusion sur les données collectées au cours de la campagne *MCM'10*, la sensibilité des modèles aux paramètres d'entrée est tout d'abord analysée. Cette comparaison est réalisée en bandes X, C et L, pour différentes valeurs de paramètres, et en respectant les domaines de validité des modèles proposés par les auteurs.

La Figure 105 présente des exemples de simulation des coefficients de rétrodiffusion (en polarisation *HH*), réalisés par les modèles d'Oh 1992, Oh 2004, Dubois et *IEM*, en bandes X, C et L. Les résultats sont présentés en fonction d'une gamme d'angle d'incidence (allant de 20 à 55°). Les simulations sont réalisées avec des paramètres de rugosité respectant les domaines de validité de chacun des modèles, à savoir : une hauteur quadratique moyenne de 1 cm et une longueur de corrélation de 9,2 cm. Concernant les paramètres de texture, les simulations sont réalisées avec des teneurs en argile et en sable similaires, de 26%. Deux niveaux d'humidité de surface sont considérés, avec en rouge les simulations associées à une faible humidité (de 12%), et en noir une forte humidité (de 33%).

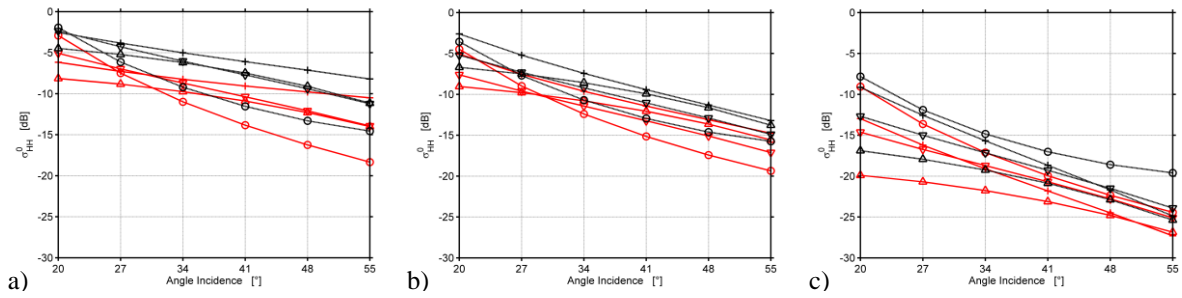


Figure 105 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion simulés par les modèles d'Oh 1992 (▲), Oh 2004 (▼), Dubois (●) et IEM (+), en bandes X a), C b) et L c), pour deux niveaux d'humidité contrastés (faible en rouge et fort en noir).

Les résultats de simulation montrent que les niveaux maximums de rétrodiffusion sont atteints avec les fréquences élevées (en bande X), les angles d'incidence faibles (à 20°), et face aux fortes valeurs d'humidité de surface (33%).

En bande X, les estimations basées sur les modèles d'Oh (version 1992 et 2004) présentent des valeurs assez proches. En conditions humides, elles sont encadrées par les coefficients de rétrodiffusion simulés par le modèle IEM (supérieures au maximum de 3 dB), et par le modèle de Dubois (inférieures au maximum de 3 dB). Ce comportement se retrouve en condition sèche, pour des angles d'incidence supérieurs à 34°.

En bande C, les différences entre les simulations des quatre modèles testés sont minimales (comparé aux autres fréquences). D'une manière générale, les valeurs maximales des coefficients de rétrodiffusion sont obtenues avec le modèle IEM, les minimales avec le modèle de Dubois. Ces simulations sont séparées par 4 dB au maximum (excepté pour les faibles angles d'incidence).

En bande L, les estimations des coefficients de rétrodiffusion sont séparées de plusieurs dB, excepté dans de rares cas, où certains modèles se rejoignent. A cette fréquence, les valeurs maximales de coefficients de rétrodiffusion sont associées au modèle de Dubois, quelle que soit l'humidité de surface. A l'inverse, les valeurs minimales sont obtenues avec le modèle d'Oh 1992.

Les résultats présentés sur la Figure 105 montrent également que la sensibilité angulaire est prononcée pour chacun des modèles (avec au minimum une dynamique de 5 dB sur la gamme d'angles d'incidence). Parmi les différents modèles, l'approche proposée par Dubois présente une sensibilité maximale face à ce paramètre. Dans le cas de l'humidité de surface, les effets des conditions contrastées sur les estimations des signaux radar sont minimums en bande C (5 dB au maximum), plus importants en bande X, et maximums en bande L. A l'inverse, les conditions de texture influencent peu l'estimation des coefficients de rétrodiffusion (excepté pour les conditions extrêmes). Les variations des valeurs de rugosité impactent de manière significative les résultats de simulations.

Cette analyse de sensibilité permet de constater l'importante variabilité des réponses obtenues par les différentes approches. La question est par conséquent de savoir, quel modèle reproduit le mieux les conditions observées.

3. METHODES D'EVALUATION ET D'AMELIORATION DES MODELES DE RETRODIFFUSION

La méthode d'évaluation et d'amélioration des modèles de rétrodiffusion est explicitée sur la Figure 106. Les cinq modèles (Oh 1992 et 2004, Dubois, *IEM* et *IEM* optimisé) sont tout d'abord évalués sur l'intégralité des données de terrain disponibles, pour les trois bandes de fréquences considérées (X, C et L), et les états de polarisations (*HH*, *VV*, *HV*) disponibles.

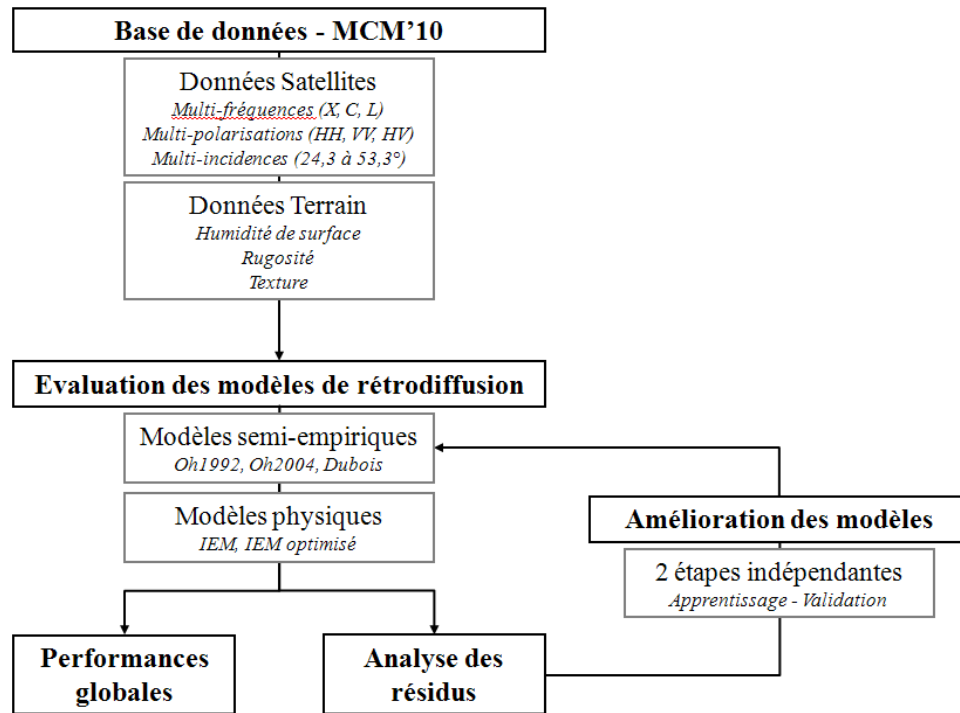


Figure 106 : Descriptif de la procédure d'évaluation et d'amélioration des modèles de rétrodiffusion radar de sol nu.

Quatre ensembles (E_i) de variables d'entrée sont considérés pour évaluer les modèles de rétrodiffusion. Ils possèdent les caractéristiques suivantes :

- E_1 : humidité mesurée au plus proche des acquisitions satellite, rugosité vue par le satellite (prenant en compte les profils parallèle et perpendiculaire), texture moyenne à l'échelle du site d'étude. Ces données sont décrites dans le Chapitre I (section 4).
- E_2 : humidité corrigée du décalage temporel (mesure terrain/acquisition satellite), rugosité vue par le satellite, texture moyenne à l'échelle du site d'étude (Chapitre I, section 4).
- E_3 : humidité corrigée du décalage temporel, rugosité vue par le satellite et prenant en compte les effets des précipitations (rugosité érodée), texture moyenne à l'échelle du site d'étude (Chapitre I, section 4).
- E_4 : humidité corrigée du décalage temporel, rugosité vue par le satellite et prenant en compte les effets des précipitations (rugosité érodée), texture moyenne à l'échelle de la parcelle (Chapitre 1, section 4).

Ces quatre ensembles ont été définis sur la base de la sensibilité des modèles aux paramètres d'entrée décrite dans la section précédente, avec une augmentation de la précision des données d'entrée, avec l'augmentation du numéro « i » de l'ensemble (E_i).

La seconde partie du travail repose sur l'amélioration des modèles de rétrodiffusion. Elle passe par l'analyse des résidus des modèles ($\sigma_{SATELLITE}^0 - \sigma_{MODELE}^0$) et porte dans un premier sur l'étude des comportements vis-à-vis des coefficients de rétrodiffusion simulés ($\sigma_{SATELLITE}^0 - \sigma_{MODELE}^0 = f(\sigma_{MODELE}^0)$). L'analyse plus poussée des résidus est effectuée dans un second temps, en fonction des différentes variables d'entrée des modèles considérés ($\sigma_{SATELLITE}^0 - \sigma_{MODELE}^0 = f(\text{hauteur quadratique moyenne, longueur de corrélation, humidité de surface, teneur en argile et sable, et l'angle d'incidence d'acquisition des images})$). La mise en œuvre et l'évaluation de ces « nouveaux » modèles est effectué à partir de deux bases de données indépendantes, à savoir une pour l'apprentissage (E_{APP}), et une pour la validation (E_{VAL}).

4. EVALUATION DES MODELES DE RETRODIFFUSION

4.1. Résultats de modélisation en bande X

4.1.1. Performances des modèles

L'évaluation des approches semi-empiriques et physique est basée sur les performances statistiques, associées aux différentes simulations (Tableau 9). Les modèles (Oh 1992 et 2004, Dubois, *IEM*, et *IEM_{OPT}*) sont mis en œuvre avec les quatre ensembles des données d'entrée (E_1 à E_4), puis comparés aux coefficients de rétrodiffusion issus des images TerraSAR-X (acquises avec la polarisation *HH*).

Les résultats montrent que les coefficients de détermination varient entre des valeurs nulles, et un maximum de 0,54. L'erreur sur l'estimation des coefficients de rétrodiffusion est comprise entre 22 et 75%, soit respectivement 2,04 et 7,04 dB, avec des biais moyens positifs ou négatifs selon le modèle considéré (entre -2,39 et 1,90 dB). La mise en œuvre des modèles avec les différentes données (E_1 à E_4) montre l'influence des valeurs d'humidité de surface et de rugosité, sur les performances des modèles. Concernant la variable **humidité**, les effets les plus importants sont observés avec les modèles d'Oh (performances associées aux données E_1 et E_2). La prise en compte des données corrigées du décalage temporel s'accompagne principalement d'une augmentation de la dispersion, avec des R^2 qui passent de 0,51 à 0,34, les autres indicateurs montrant des comportements contrastés. Cette dégradation des résultats de simulation souligne l'impact important de la variation d'humidité de surface sur le signal radar en bande X. Selon les travaux d'Oh, 2000 la profondeur de pénétration du signal en bande X n'excède pas 2,5 cm. Les mesures d'humidité étant faites entre 0 et 5 cm, la méthode de correction appliquée sur les valeurs d'humidité est donc biaisée par la profondeur de mesure initiale. Seules des mesures de terrain effectuées entre 0 et 2 cm, de manière quasi-synchrones avec le passage du satellite permettrait de limiter ce problème. La prise en compte de l'**érosion des profils de rugosité** (E_2 et E_3) permet d'améliorer les résultats des modèles de Dubois et de l'*IEM*, avec une réduction de l'erreur et du biais qui passent respectivement de 7,04 à 5,13 dB, et de -2,39 à -0,78 dB (dans le cas du modèle *IEM*). L'impact de la **texture du sol** en bande X semble très négligeable sur les modèles. En effet, malgré la forte variabilité des textures de surfaces, les résultats sont quasi-similaires en considérant une texture moyenne au paysage, ou la texture propre à la parcelle (E_3 et E_4).

	n	RMSE [dB]	rRMSE [%]	R ²	Biais [dB]	a	b [dB]
Oh 1992							
E ₁	283	2,04	22	0,54	-0,49	1,09	0,31
E ₂	283	2,37	25	0,34	-0,92	0,79	-2,88
E ₃	283	2,44	26	0,34	-1,12	0,79	-3,09
E ₄	283	2,44	26	0,34	-1,12	0,79	-3,09
Oh 2004							
E ₁	283	2,78	30	0,51	1,20	1,27	3,70
E ₂	283	2,74	29	0,35	0,80	0,99	0,68
E ₃	283	2,72	29	0,34	0,25	0,99	0,15
E ₄	283	2,72	29	0,34	0,25	0,99	0,15
Dubois							
E ₁	283	4,79	51	0,41	1,90	1,78	9,16
E ₂	283	4,77	51	0,39	1,78	1,71	8,38
E ₃	283	4,68	50	0,34	0,04	1,64	6,03
E ₄	283	4,68	50	0,34	0,04	1,64	6,03
IEM							
E ₁	283	6,54	70	0,04	-2,01	-0,53	-16,33
E ₂	283	7,04	75	0,07	-2,39	-0,80	-19,20
E ₃	283	5,13	55	0,00	-0,78	-0,15	-11,50
E ₄	283	5,13	55	0,00	-0,78	-0,15	-11,50
IEMopt							
E ₁	283	3,43	37	0,01	0,92	0,10	-7,47
E ₂	283	3,70	40	0,01	0,54	-0,17	-10,34
E ₃	283	3,22	34	0,00	1,09	0,07	-7,63
E ₄	283	3,22	34	0,00	1,09	0,07	-7,63

Tableau 9 : Performances statistiques associées à la mise en œuvre des différents modèles en bande X (en polarisation HH). Les simulations sont effectuées sur la base de différents ensembles de données (E₁ à E₄). Les paramètres relatifs à la droite de régression sont notés a et b.

Les approches développées par Oh présentent les meilleures performances. Les deux versions testées sont associées à des coefficients de détermination proches (0,54 et 0,51 au maximum). Les erreurs sur les coefficients de rétrodiffusion sont minimales dans le cas de la version de 1992, avec 2,04 dB (contre 2,78 dB pour la version de 2004), et un biais négatif de -0,49 dB (soit une légère tendance du modèle à la sous-estimation des valeurs, à l'inverse de la version de 2004). Les modèles de Dubois et l'IEM présentent une dispersion plus importante des simulations, les erreurs sur l'estimation des coefficients de rétrodiffusion sont respectivement proches de 4,7 dB, et supérieures à 5 dB. Cette erreur sur l'estimation des coefficients de rétrodiffusion diminue avec les modifications proposées par Baghdadi. Elle est alors inférieure à 4 dB, quelque soit l'ensemble de données considéré. Toutefois, l'optimisation du modèle (permettant de s'affranchir de la longueur de corrélation) ne s'accompagne pas d'une meilleure simulation des coefficients de rétrodiffusion, les coefficients de détermination restant nuls.

La Figure 107 illustre la comparaison entre les mesures et les simulations issues des différents modèles, basées sur l'ensemble E₄ (à savoir les valeurs des paramètres d'entrée les mieux corrigées a priori). Sur chacun des graphiques, les simulations respectant les domaines de validité (tels que définis par les auteurs), sont représentées en noir, alors que les simulations effectuées en dehors du domaine de validité sont affichées en bleu.

Les domaines de validité limitent théoriquement les possibilités d'application des modèles à 59% (n=168) et 79% (n=224) des observations dans le cas des modèles d'Oh (1992 et 2004), et à seulement 32% (n=91) et 19% (n=55) des observations pour les modèles *IEM* et Dubois (Figure 107).

Néanmoins, la séparation entre les simulations dans et hors domaine de validité est plus ou moins marquée selon les modèles considérés. Pour les modèles d'Oh, l'ensemble des points présentent des dispersions proches, et aucune différence n'est observable entre les points « valides » et « non valides ». Dans le cas du modèle *IEM*, la prise en compte des données hors domaine de validité amplifie la dispersion. Enfin, concernant le modèle de Dubois, les simulations dans et hors domaine de validité sont clairement distinctes. Toutefois les simulations effectuées dans le domaine de validité sous-estiment fortement les valeurs des coefficients de rétrodiffusion.

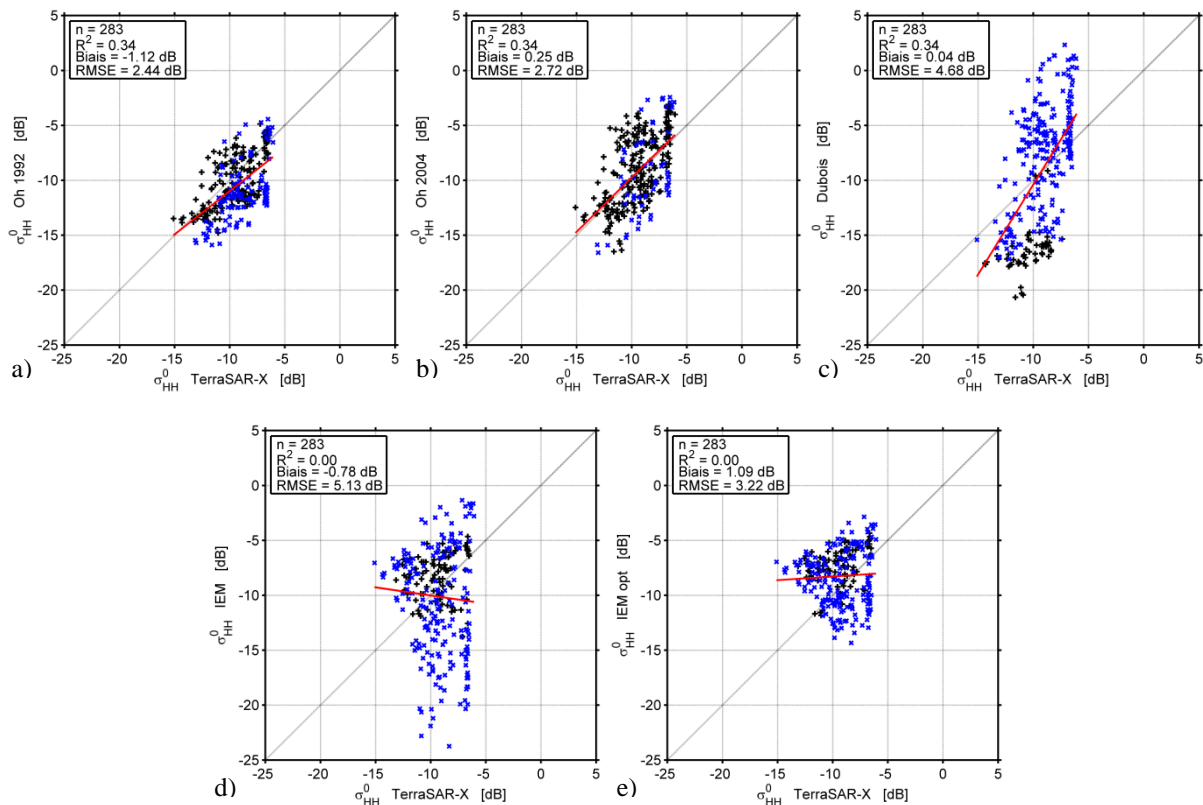


Figure 107 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus des images satellites TerraSAR-X (bande X, polarisation HH), à ceux simulés par les modèles d'Oh (1992 a), et 2004 b)), de Dubois c) et au modèle *IEM* (originel d) et optimisé e)). Les figurés noirs et bleus distinguent les simulations dans et hors domaine de validité des modèles.

Ces performances obtenues en bande X sont conformes aux travaux présentés par Baghdadi et al., 2011b, où ces modèles sont évalués avec des données de terrain et satellites (TerraSAR-X) acquises en France et en Tunisie. Dans cette étude, les coefficients de rétrodiffusion simulés montrent une importante dispersion (Figure 108), proche de celle observée sur la Figure 107. Les erreurs sur l'estimation des coefficients de rétrodiffusion sont de 2,64 dB (pour Oh 2002), 3,85 dB (pour Dubois), et entre 3,51 et 4,89 dB (pour l'*IEM*, selon les deux classes de rugosité de surface considérées).

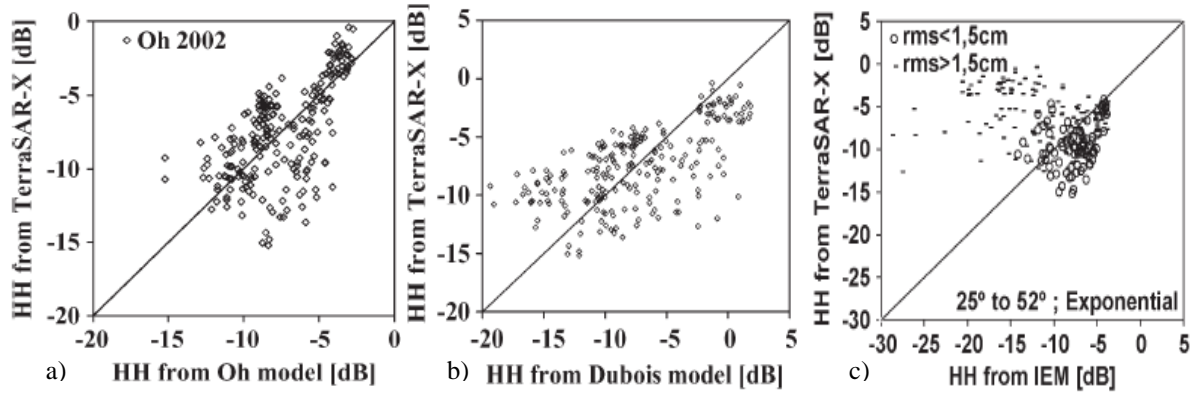


Figure 108 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus des images satellites TerraSAR-X (bande X, polarisation HH), à ceux simulés par les modèles d'Oh 2002 a), de Dubois b) et au modèle IEM c). (Baghdadi et al., 2011b)

4.1.2. Analyse des résidus

Modèle d'Oh 1992

Le modèle d'Oh 1992 sous-estime les coefficients de rétrodiffusion, comme en témoignent les valeurs des résidus qui sont majoritairement positives avec un biais moyen de 1,12 dB (Figure 109). Une forte tendance décroissante est également observée entre les résidus et les

valeurs simulées, caractérisée par une pente négative de -0,57. Les simulations hors domaine de validité (en bleu), sont majoritairement associées à des valeurs de résidus positives (soit une sous-estimation), alors que dans le domaine de validité, les résidus sont mieux répartis autour de 0 (entre -4 et 4 dB).

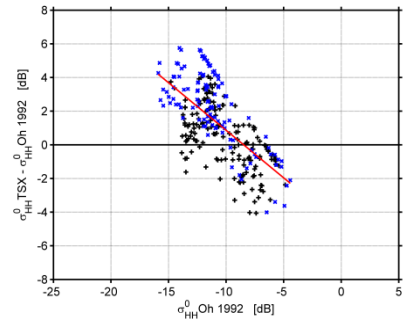


Figure 109 : Résidus du modèle d'Oh 1992 tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.

La Figure 110 présente le comportement des résidus du modèle d'Oh 1992, tracés en fonction des différentes variables relatives aux conditions de surface (rugosité, humidité, texture), ou à la configuration du capteur (angle d'incidence). Pour chacune des variables, la tendance générale à l'ordre 1 (prenant en compte l'ensemble des résidus dans et hors domaine de validité du modèle) est matérialisée par la droite de couleur rouge.

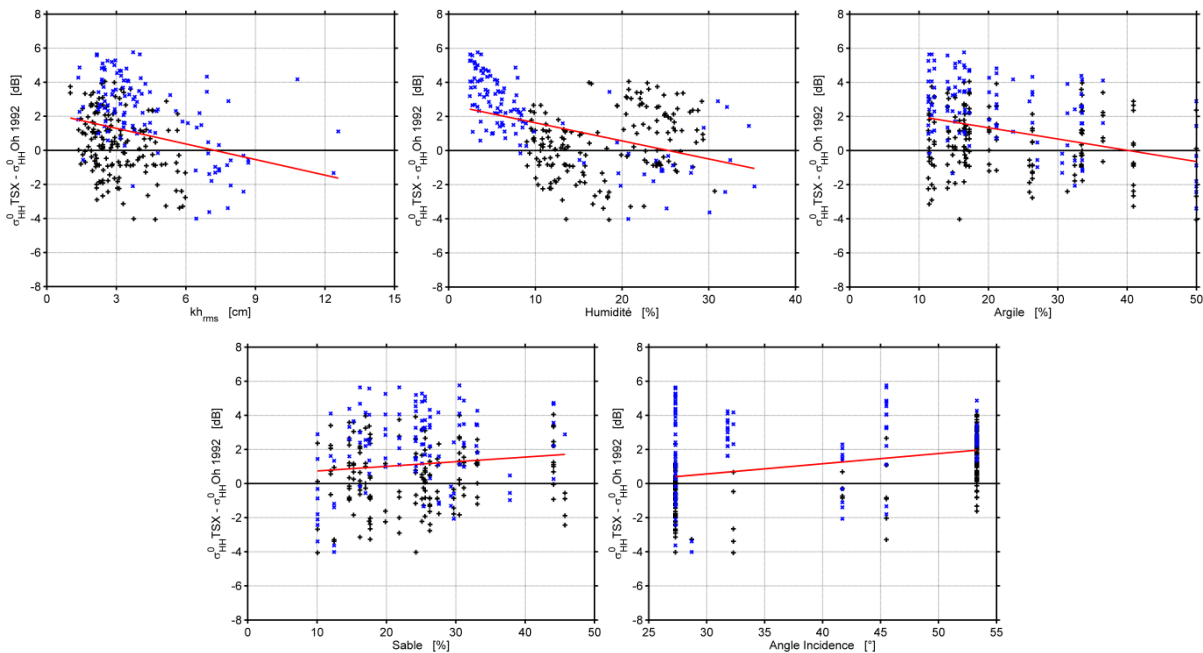


Figure 110 : Résidus du modèle d'Oh 1992 en bande X, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité, de la texture (teneurs en argile et en sable), et de l'angle d'incidence.

Face aux différentes variables d'entrée, les résidus présentent soit des tendances décroissantes (en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité de surface, et de la teneur en argile), soit croissantes (en fonction de la teneur en sable ou de l'angle d'incidence). Pour chacune de ces variables, les dynamiques sont marquées, (plusieurs dB) sur l'intervalle de variation observé. L'effet sur la valeur des résidus est voisin de 3,5 dB

concernant l'humidité de surface et la hauteur quadratique moyenne ; il est de 2,6 dB avec la teneur en argile. Les dynamiques sont moins prononcées en fonction de l'angle d'incidence (1,6 dB) et de la teneur en argile (1dB).

Le comportement particulier des résidus face à l'humidité du sol mérite une analyse plus précise. Deux classes de points sont remarquables, avec un ensemble associé à des valeurs inférieures à 16%, et l'autre pour lequel les valeurs sont supérieures à 16%. Pour les valeurs d'humidité inférieures à 16%, les résidus présentent une forte décroissance, passant de valeurs positives à négatives. Dans cet intervalle, les résidus hors domaine de validité (correspondant à des humidités de surface inférieures à 9%) viennent prolonger la tendance décroissante. Ils présentent par conséquent un comportement cohérent avec les résidus associés aux humidités comprises entre 11 et 16%. Passée cette valeur, aucune tendance claire n'est distinguée, les résidus étant distribués de part et d'autre de zéro.

Modèle d'Oh 2004

Comme dans le cas de la version de 1992, les résidus du modèle d'Oh 2004 sont associés aux valeurs simulées par une forte tendance décroissante (Figure 111). Le coefficient directeur de la droite reliant ces deux variables est alors de -0,66. La moyenne de la différence entre mesure et modèle est proche de zéro (-0,25 dB), néanmoins les valeurs des résidus sont importantes, comprises dans l'intervalle -6,7 à 5,4 dB. Sur la Figure 111, les résidus hors domaine de validité (en bleu) ne présentent pas de comportement particulier, comparés aux autres résidus.

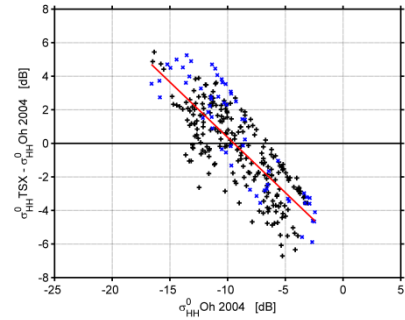


Figure 111 : Résidus du modèle d'Oh 2004 tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.

La Figure 112 présente le comportement des résidus du modèle d'Oh 2004, tracés en fonction des différentes variables relatives aux conditions de surface, ou à la configuration du capteur. La présentation des résidus n'est pas effectuée vis-à-vis de la texture, ce paramètre ne constituant pas une variable d'entrée du modèle.

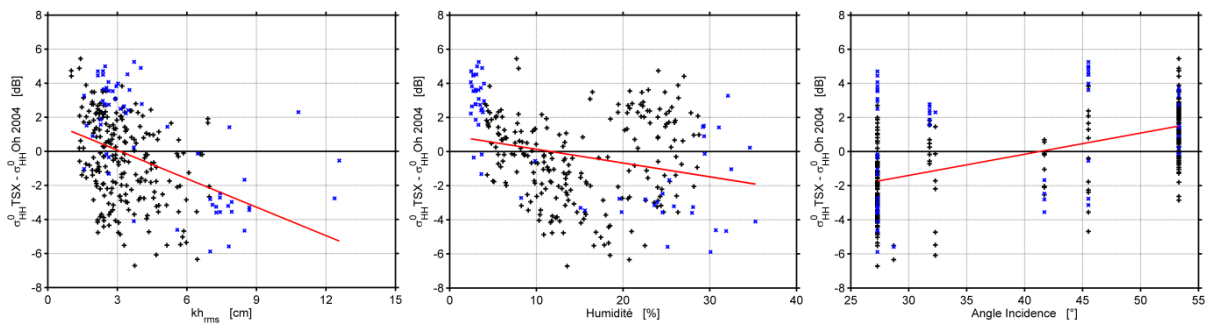


Figure 112 : Résidus du modèle d'Oh 2004 en bande X, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité et de l'angle d'incidence.

Le comportement des résidus face aux variables d'entrée présentées ci-dessus est comparable aux observations faites pour la version de 1992. Une augmentation des valeurs est observée avec l'angle d'incidence, contre une diminution face à la hauteur quadratique moyenne, ou à l'humidité de surface. Avec un impact sur les valeurs de résidus proche de 6,4 dB sur l'intervalle observé, la hauteur quadratique moyenne présente la dynamique maximale. Elle est suivie de la sensibilité en fonction de l'angle d'incidence (3,2 dB) et de l'humidité de surface (2,7 dB).

Dans le cas de l'humidité de surface, la dynamique est légèrement moins prononcée que précédemment, comme en témoigne le coefficient directeur de la droite, qui est de -0,08 dB par %. Il était égal à -0,11 dB par %, pour la version de 1992. Le comportement particulier des résidus (pour des valeurs d'humidité inférieures à 16%) est toujours présent, avec toutefois une dispersion plus importante des valeurs. En outre, les résidus associés aux humidités inférieures à la borne minimale du domaine de validité (soit les valeurs inférieures à 4%) prolongent la tendance décroissante.

Modèle de Dubois

Les simulations dans le domaine de validité sont associées aux valeurs maximales de résidus. Elles sous-estiment les coefficients de rétrodiffusion (Figure 113). Les résidus hors du domaine de validité, majoritaires, s'inscrivent dans la continuité des précédents. Il en résulte une tendance décroissante très marquée, avec un coefficient directeur de -0,80. La dispersion autour de cette tendance est moins importante que pour les modèles d'Oh. Les résidus couvrent toutefois un large intervalle de valeurs (-9,7 à 9,5 dB), avec un biais moyen de -0,04 dB.

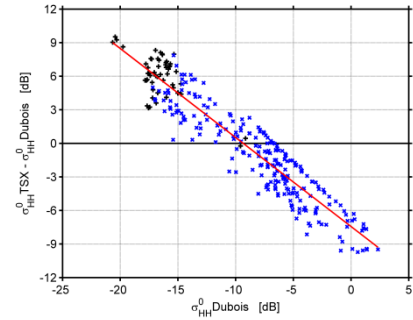


Figure 113 : Résidus du modèle de Dubois tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.

La Figure 114 présente le comportement des résidus du modèle de Dubois, tracés en fonction des différentes variables relatives aux conditions de surface, ou à la configuration du capteur.

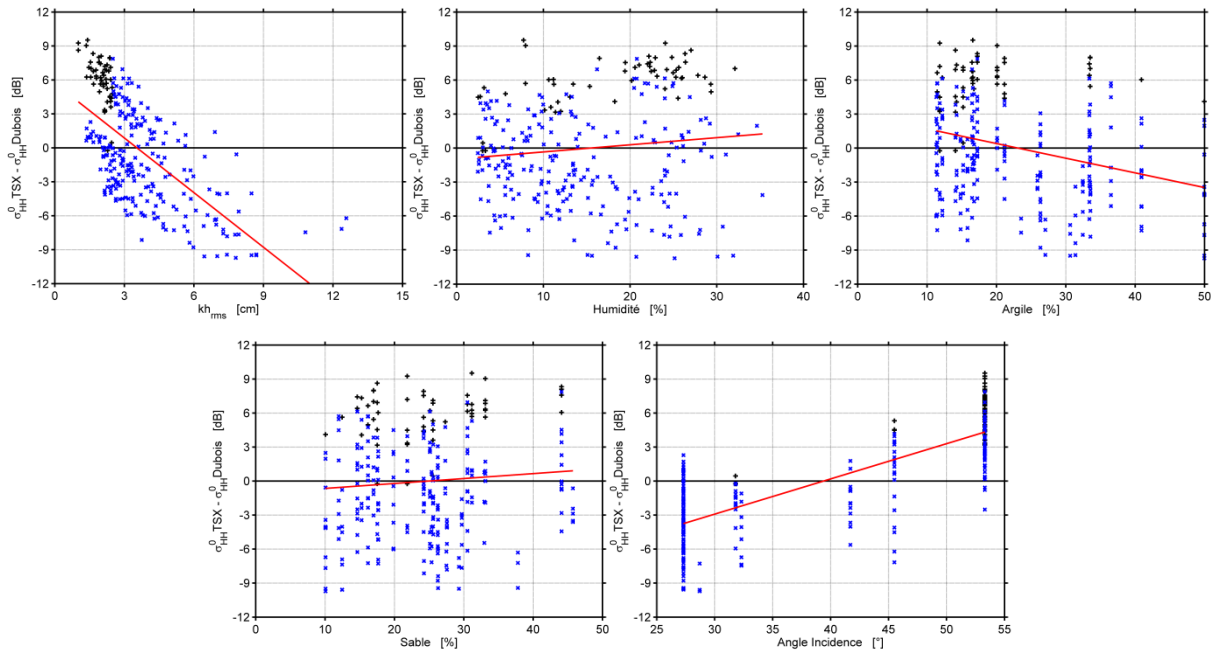


Figure 114 : Résidus du modèle de Dubois en bande X, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité, de la texture (teneurs en argile et en sable), et de l'angle d'incidence.

Les résidus présentent des comportements et des dynamiques fortement contrastés. Face à la teneur en sable ou à l'humidité de surface, la dispersion des résidus est assez élevée et homogène sur l'intégralité de la gamme de variation. L'effet sur les valeurs de résidu est au maximum de 2 dB, inférieur aux dynamiques observées avec les autres variables. L'augmentation des valeurs avec l'angle d'incidence est proche de 8 dB, entre les valeurs acquises à 27,3° et celles à 53,3° (soit 0,31 dB par degrés). Face à la teneur en argile, l'effet sur les valeurs est de 5 dB ; il est maximal face à la hauteur quadratique moyenne, où il atteint 18 dB.

Deux groupes de points se distinguent, face à la hauteur quadratique moyenne, avec une dynamique comparable. Cette séparation est engendrée par la sensibilité des résidus à l'angle d'incidence. La tendance marquée face à cette variable se retrouve dans la dynamique des résidus face à la rugosité.

Modèle IEM

Les résidus du modèle *IEM* sont compris dans l'intervalle -8 à 16 dB, avec une valeur moyenne positive de 0,78 dB. Sur la Figure 115, ils montrent une forte décroissance linéaire, avec l'augmentation des valeurs simulées. Le coefficient directeur de la droite de tendance est proche de -1,03. Le modèle surestime les valeurs des coefficients de rétrodiffusion jusqu'à une valeur seuil proche de -9 dB, au-delà, les valeurs sont sous-estimées.

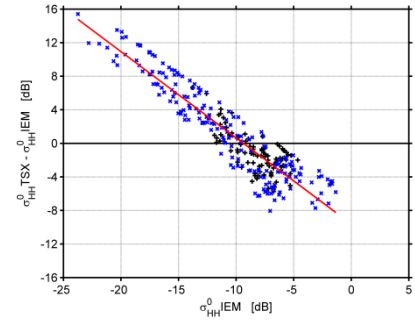


Figure 115 : Résidus du modèle *IEM* tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.

La Figure 116 présente les résidus du modèle *IEM*, tracés en fonction des différentes variables d'entrée, relatives aux conditions de surface, ou à la configuration du capteur.

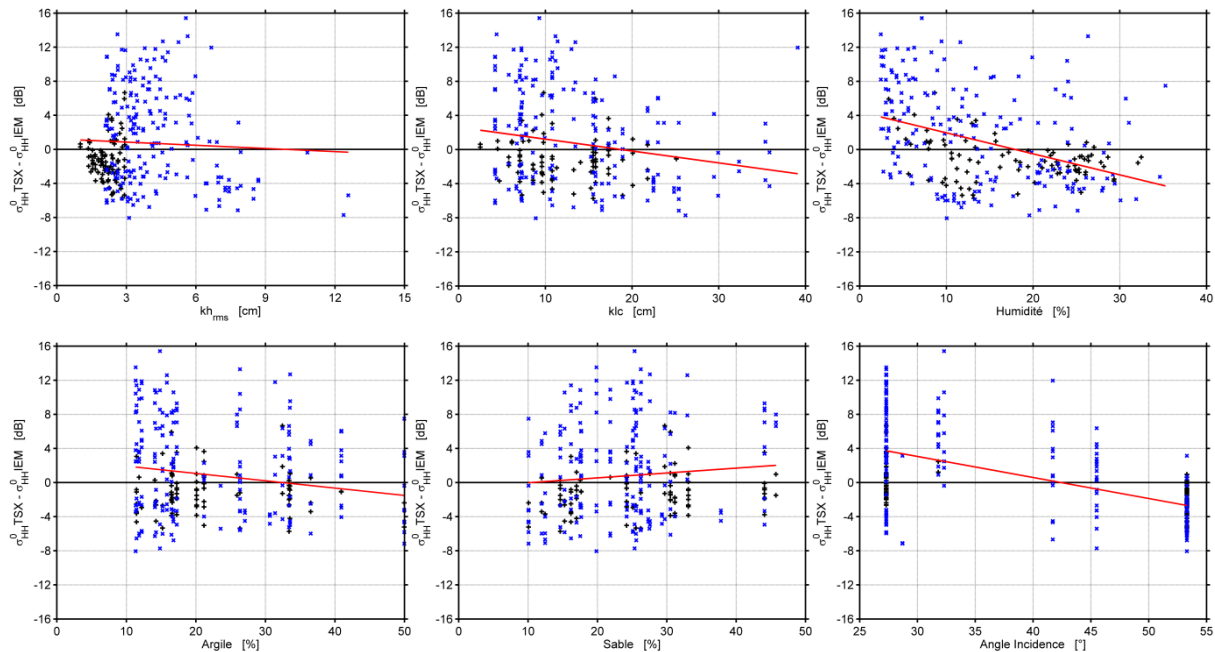


Figure 116 : Résidus du modèle *IEM* en bande X, tracés en fonction des paramètres relatifs à la rugosité (hauteur quadratique moyenne et longueur de corrélation), à l'humidité de surface, à la texture (teneur en argile et en sable), et à l'angle d'incidence.

Les comportements des résidus sont différents de ceux observés avec les modèles semi-empiriques. Face aux différentes variables, les tendances sont décroissantes, à l'exception de celle observée face à la teneur en sable. L'effet sur les valeurs des résidus est alors de 2 dB. Concernant les autres variables, la diminution des valeurs des résidus, sur l'intervalle de variation observé, varie entre 1,4 dB (pour la hauteur quadratique moyenne), et 8,1 dB (face à l'humidité de surface).

Face à la hauteur quadratique moyenne, les résidus présentent deux comportements distincts. Pour des valeurs de h_{rms} inférieures à 2 cm, les résidus sont négatifs et peu dispersés. Passée cette valeur, la dispersion est plus importante. Ce comportement s'explique probablement par la sensibilité à l'angle d'incidence, avec une dynamique de 0,25 dB par degrés (correspondant à un effet supérieur à 6 dB, sur les 26° de différence entre faible et forte incidences).

Modèle IEM optimisé

Les modifications proposées par Baghdadi se traduisent par une réduction de l'intervalle des valeurs des résidus (Figure 117). Ils sont compris entre -8 et 6 dB (contre -8 à 16 dB précédemment). La valeur moyenne caractérisant le nuage de points devient négative, soit -1,09 dB (témoignant la surestimation des coefficients de rétrodiffusion). Face aux valeurs simulées, les résidus présentent toujours une forte décroissance linéaire, avec une pente proche de -0,96.

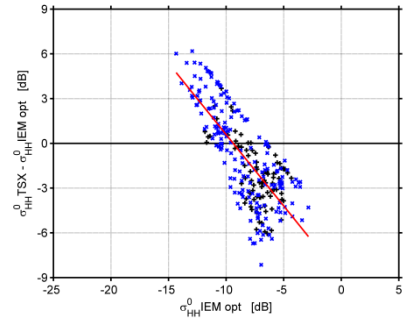


Figure 117 : Résidus du modèle IEM optimisé tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.

La Figure 118 présente les résidus du modèle IEM optimisé, tracés en fonction des différentes variables d'entrée, relatives aux conditions de surface, ou à la configuration du capteur.

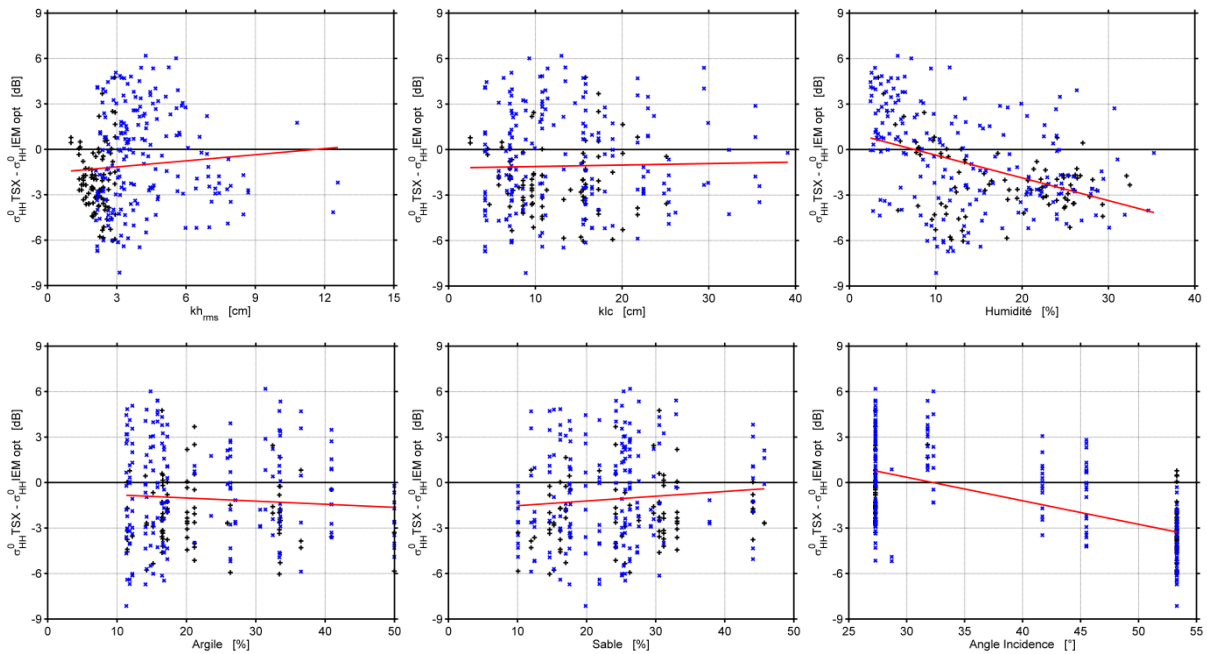


Figure 118 : Résidus du modèle IEM optimisé en bande X, tracés en fonction des paramètres relatifs à la rugosité (hauteur quadratique moyenne et longueur de corrélation), à l'humidité de surface, à la texture (teneur en argile et en sable), et à l'angle d'incidence.

Suite aux modifications proposées par Baghdadi, la tendance vis-à-vis de la longueur de corrélation disparaît. La dynamique vis-à-vis de ce paramètre n'est plus que de 0,36 dB. En revanche, les tendances des résidus face à l'humidité de surface ou à l'angle d'incidence sont toujours prononcées, avec des dynamiques de 4,91 et 4,03 dB respectivement. Enfin, les valeurs des résidus augmentent avec la hauteur quadratique moyenne (elles diminuaient avant les modifications), avec une dynamique de 1,56 dB.

4.2. Résultats de modélisation en bande C

4.2.1. Performances des modèles

L'évaluation des approches semi-empiriques (modèles d'Oh 1992, 2004, et de Dubois) et physique (*IEM* et *IEM* optimisé) est basée sur les indicateurs statistiques présentés dans le Tableau 10. Les simulations effectuées à partir des différents ensembles de données (E_1 à E_4) sont confrontées aux coefficients de rétrodiffusion dérivés des images Radarsat-2 (seuls les résultats relatifs à la polarisation *HH* sont présentés).

Les performances statistiques associées aux différents modèles sont médiocres, comme en témoignent les coefficients de détermination qui n'excèdent pas 0,35. Ils sont associés à des erreurs relatives sur les coefficients de rétrodiffusion comprises entre 25 et 50%, soit respectivement 2,11 et 4,33 dB. Les modèles sont en grande majorité associés à des biais positifs, traduisant une surestimation des valeurs simulées. Les performances associées aux différents ensembles de données (E_1 à E_4 dans le Tableau 10) montrent d'une part que les effets de la correction de l'**humidité** de surface (performances associées aux données E_1 et E_2), ainsi que la prise en compte de valeurs de **texture** à la parcelle (comparaisons E_3 et E_4) n'influencent que peu les résultats des modèles. Concernant les modèles semi-empiriques, une très légère diminution du biais est observée lors de la prise en compte des données d'humidité corrigées. Le biais passe ainsi de 0,68 à 0,62 dB dans le cas du modèle d'Oh 1992. A l'inverse, la prise en compte de l'**érosion des profils de rugosité** dans les différents modèles est plus marquée, elle s'accompagne de résultats contrastés (simulations basées sur les données E_2 et E_3). Concernant les modèles semi-empiriques, elle se traduit par une augmentation de la dispersion, et une diminution des valeurs de biais. Les modèles d'Oh montrent ainsi des valeurs de R^2 qui passent de 0,30 à 0,19, et des biais qui deviennent quasi-nuls. Dans le cas du modèle *IEM*, les performances statistiques sont meilleures avec la prise en compte de l'érosion des profils de rugosité. Elles se traduisent par une augmentation des valeurs de R^2 (0,12 contre 0,01), et une diminution de la *RMSE* (3,33 dB contre 4,33 dB). Concernant la version du modèle *IEM* proposée par Baghdadi, les effets des différentes valeurs de rugosité sont moins prononcés, le modèle étant modifié afin de se soustraire de la longueur de corrélation. En résumé, ces résultats illustrent l'influence des paramètres relatifs à la rugosité (h_{rms} et lc) sur les modèles de rétrodiffusion, qu'ils soient semi-empiriques ou physiques.

	n	RMSE [dB]	rRMSE [%]	R ²	Biais [dB]	a	b [dB]
Oh 1992							
E ₁	222	2,11	24	0,32	0,68	0,51	-3,54
E ₂	222	2,11	25	0,31	0,62	0,50	-3,72
E ₃	222	2,27	26	0,19	0,00	0,39	-5,22
E ₄	222	2,27	26	0,19	0,00	0,39	-5,22
Oh 2004							
E ₁	222	2,54	30	0,32	1,16	0,64	-1,91
E ₂	222	2,55	30	0,30	1,09	0,63	-2,13
E ₃	222	2,58	30	0,19	0,19	0,49	-4,17
E ₄	222	2,58	30	0,19	0,19	0,49	-4,17
Dubois							
E ₁	222	3,99	46	0,19	2,23	0,69	-0,43
E ₂	222	4,01	47	0,18	2,18	0,68	-0,60
E ₃	222	3,66	43	0,10	0,76	0,50	-3,57
E ₄	222	3,66	43	0,10	0,76	0,50	-3,57
IEM							
E ₁	222	4,33	50	0,01	-0,42	0,18	-7,49
E ₂	222	4,33	50	0,01	-0,47	0,17	-7,65
E ₃	222	3,33	39	0,12	0,55	0,51	-3,63
E ₄	222	3,33	39	0,12	0,55	0,51	-3,63
IEMopt							
E ₁	222	2,50	29	0,26	1,44	0,40	-3,74
E ₂	222	2,47	29	0,25	1,39	0,39	-3,90
E ₃	222	2,39	28	0,23	1,21	0,36	-4,32
E ₄	222	2,39	28	0,23	1,21	0,36	-4,32

Tableau 10 : Performances statistiques associées à la mise en œuvre des différents modèles en bande C (en polarisation HH). Les simulations sont effectuées sur la base des différents ensembles de données (E1 à E4). Les paramètres relatifs à la droite de régression sont notés a et b.

Les approches semi-empiriques proposées par Oh (versions 1992 ou 2004) offrent les meilleures performances. Elles présentent ainsi les valeurs maximales concernant les coefficients de détermination (avec 0,32), avec des erreurs comprises entre 2,11 et 2,58 dB. Concernant le modèle *IEM*, les modifications proposées par Baghdadi améliorent les résultats, comme en témoignent les valeurs des coefficients de détermination (qui dépassent 0,2), et celles de *RMSE* (qui sont proches de celles observées avec les modèles d'Oh). Néanmoins, comme dans le cas des autres modèles, la dispersion reste importante. Quelque soit le modèle considéré, les simulations sont associées à des tendances similaires, à savoir une surestimation des valeurs faibles, et le phénomène inverse pour les valeurs importantes de coefficients de rétrodiffusion.

La Figure 119 présente les résultats des modèles de rétrodiffusion basés sur l'ensemble de données *E₄* (à savoir les valeurs des paramètres d'entrée les mieux corrigées a priori). Comme précédemment pour les résultats en bande X, les couleurs noires et bleues distinguent les simulations dans et hors domaine de validité des modèles. Les conditions de surface observées dépassent les limites théoriques des domaines de validité des différents modèles. Toutefois, les simulations hors domaine de validité sont moins nombreuses que précédemment, les limites sur la hauteur quadratique moyenne étant moins restrictives à cette fréquence. Par exemple, dans le cas du modèle d'Oh 1992, les valeurs de h_{rms} prises en compte passent d'un intervalle de [0,05

à 2,97 cm] en bande X, à [0,09 à 5,31 cm] en bande C. La plupart des observations respectent les limites proposées par les auteurs, soit respectivement 78% (n=174) des mesures, pour le modèle d'Oh 1992, 88% (n=195), pour Oh 2004, et 59% (n=131), pour l'*IEM*. L'application du modèle de Dubois est théoriquement limitée à 52% (n=115) des observations.

La distinction des simulations, sur la base des domaines de validité, apparaît toutefois difficile dans le cas des modèles d'Oh, les deux groupes de points (en bleu et noir) présentant des dispersions assez proches. Dans le cas du modèle *IEM* originel, la dispersion associée aux simulations hors domaine de validité est plus importante. Concernant le modèle de Dubois, les simulations répondant aux critères du domaine de validité sous-estiment les valeurs des coefficients de rétrodiffusion, à l'inverse celles en dehors surestiment ces valeurs.

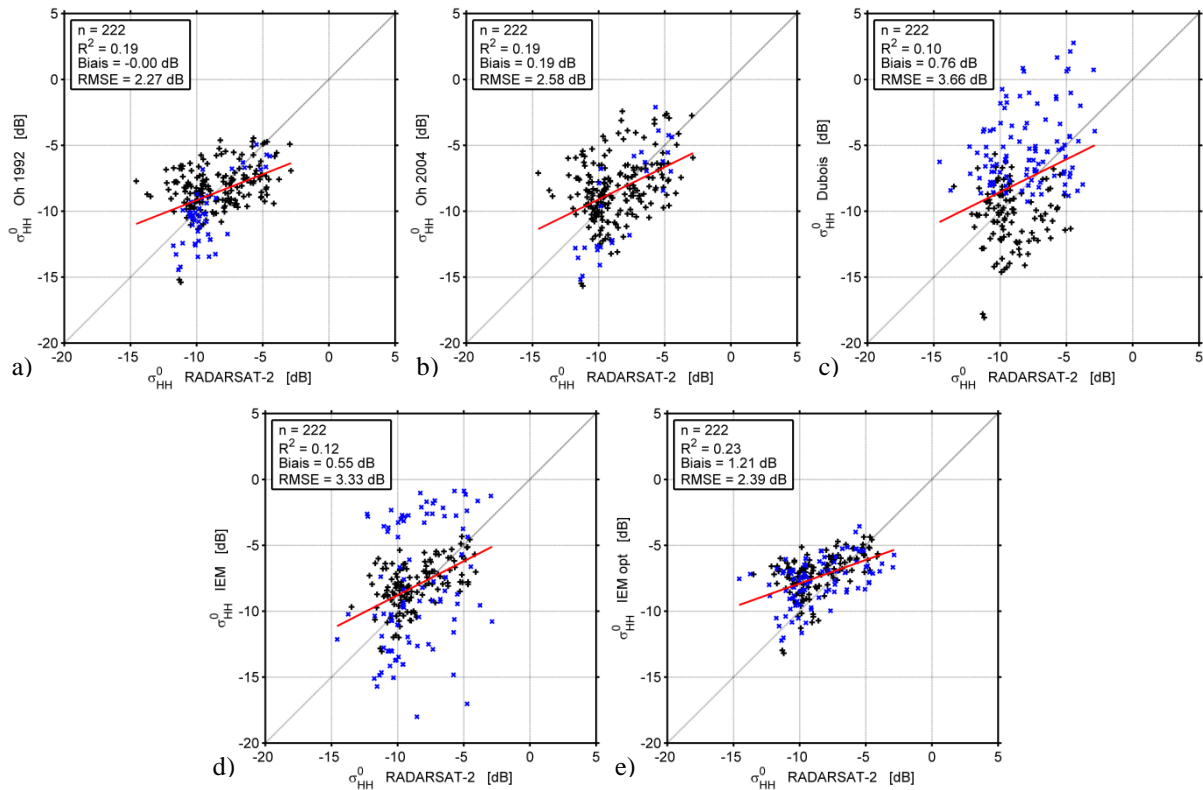


Figure 119 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus des images satellites Radarsat-2 (bande C, polarisation HH), à ceux simulés par les modèles d'Oh (1992 a), et 2004 b), de Dubois c) et au modèle *IEM* (originel d) et optimisé e). Les figurés noirs et bleus distinguent les simulations dans et hors domaine de validité des modèles.

Ces performances sont à rapprocher des travaux menés par Baghdadi and Zribi, 2006, qui visent à l'évaluation des modèles de rétrodiffusion (Oh, Dubois et *IEM*) en bande C. La comparaison des modèles est basée sur différents jeux de données, acquis sur des sites d'études localisés en France et au Canada. Les simulations des coefficients de rétrodiffusion sont alors confrontées à des données délivrées par les satellites ERS-2, Radarsat-1 et Envisat-ASAR. Les erreurs sur l'estimation des coefficients de rétrodiffusion (en polarisation HH) sont de 4,43 dB pour Dubois, et 4,76 dB pour l'*IEM*.

4.2.2. Analyse des résidus

Modèle d'Oh 1992

Les résidus du modèle d'Oh 1992 présentent une importante dispersion (Figure 120). La tendance générale du nuage de point est décroissante, comme en témoigne le coefficient directeur de -0,51. La valeur moyenne de la différence entre les mesures et les simulations du modèle d'Oh 1992 est quasi-nulle. Les résidus sont toutefois importants, compris dans l'intervalle : -6,9 à 5,2 dB. Les résidus hors domaine de validité (en bleu) sont pour partie mélangés aux autres valeurs, et associés aux valeurs simulées inférieures à -10 dB.

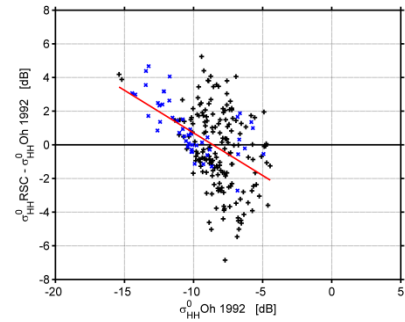


Figure 120 : Résidus du modèle d'Oh 1992 tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.

Le comportement des résidus du modèle d'Oh 1992 vis-à-vis des différentes variables, relatives aux conditions de surface ou à la configuration du capteur, est présenté sur la Figure 121.

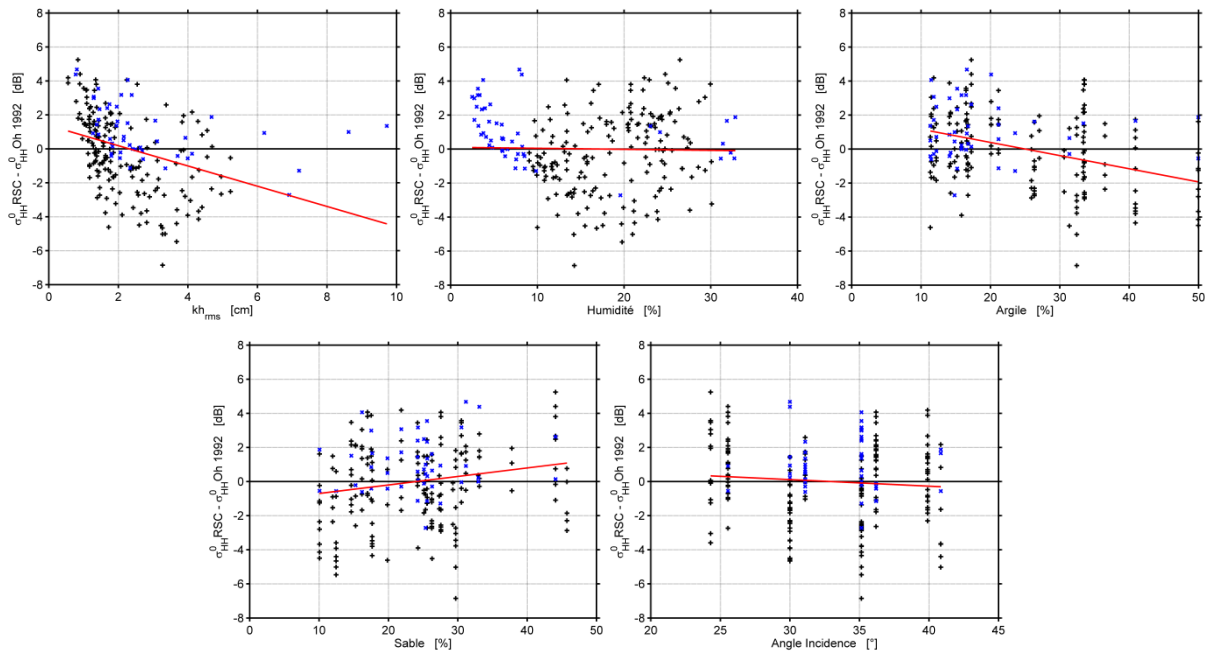


Figure 121 : Résidus du modèle d'Oh 1992 en bande C, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité, de la texture (teneurs en argile et en sable), et de l'angle d'incidence.

Face aux différentes variables d'entrée, les résidus présentent des tendances quasi-nulles (en fonction de l'humidité de surface, et de l'angle d'incidence), croissantes (en fonction de la teneur en sable), ou décroissantes (en fonction de la hauteur quadratique moyenne, et de la teneur en argile). Avec 5,5 dB, la dynamique la plus marquée est observée avec le paramètre de rugosité (h_{rms}). Concernant la texture, les dynamiques antagonistes sont de 3 dB avec la composante argile, contre 2 dB avec le sable. Dans le cas de l'angle d'incidence et de l'humidité de surface, les dynamiques sont inférieures à 1 dB. Dans le cas de l'humidité de surface, une tendance décroissante prononcée est observée pour les mesures d'humidité inférieures à 9% (hors domaine de validité du modèle).

Modèle d'Oh 2004

Comme dans le cas de la version de 1992, la tendance entre les résidus et les valeurs simulées est décroissante (Figure 122). Cette tendance est plus prononcée que précédemment, elle est caractérisée par une pente de $-0,62$. L'intervalle de variation des résidus est compris entre $-7,5$ et $4,9$ dB. Les valeurs sont décalées vers la partie négative (correspondant à une surestimation), comme en témoigne la moyenne de $-0,19$ dB. Les résidus dans et hors domaine de validité (respectivement en noir et bleu) présentent des dispersions similaires.

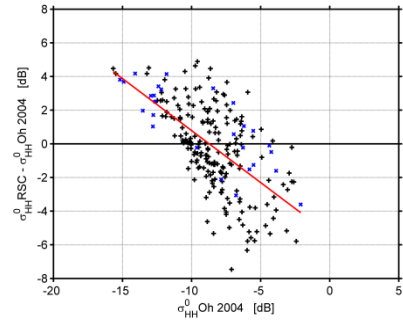


Figure 122 : Résidus du modèle d'Oh 2004 tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.

La Figure 123 présente le comportement des résidus du modèle d'Oh 2004, tracés en fonction des différentes variables relatives aux conditions de surface, ou à la configuration du capteur.

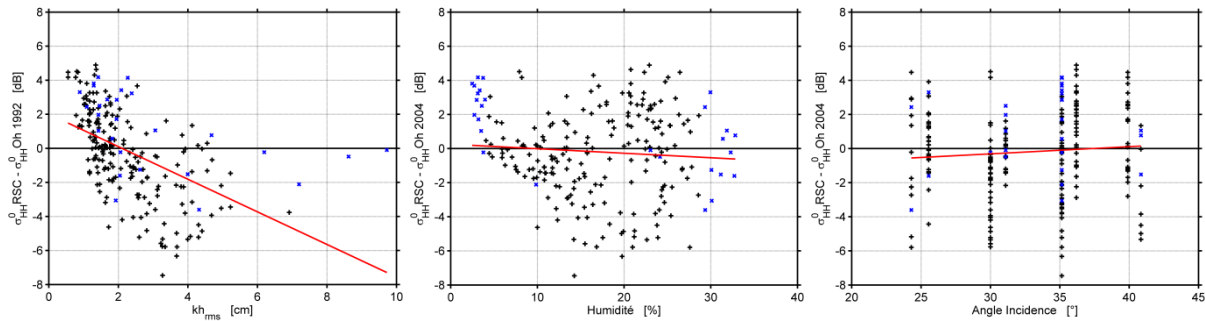


Figure 123 : Résidus du modèle d'Oh 2004 en bande C, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité, et de l'angle d'incidence.

Le comportement des résidus en fonction des variables d'entrée est comparable aux observations précédentes, malgré un formalisme différent de la version de 1992 (se traduisant notamment par une réduction du nombre de variables d'entrée). Une légère augmentation des valeurs est observée avec l'angle d'incidence, contre une diminution vis-à-vis de l'humidité ou de la hauteur quadratique moyenne.

Face à la hauteur quadratique moyenne, la forte décroissance observée, avec une dynamique proche de $5,5$ dB (soit $-0,96$ dB par cm) est similaire à celle observée précédemment. Il est à noter que le comportement particulier des résidus pour les valeurs d'humidité de surface inférieures à 9% est également présent. Dans le cas de la version de 2004, la borne minimale du domaine de validité est pourtant de 4% .

Modèle de Dubois

Le domaine de validité défini par les auteurs du modèle sépare les résidus en deux groupes. Les simulations respectant les limites sont associées à une sous-estimation, et inversement. Toutefois, ces deux groupes de résidus présentent une même décroissance linéaire, avec une pente de -0,80. Les valeurs des résidus sont importantes, comprises dans l'intervalle : -9,1 à 6,9 dB, avec une valeur moyenne de -0,76 dB, soulignant la tendance générale du modèle à surestimer les valeurs des coefficients de rétrodiffusion.

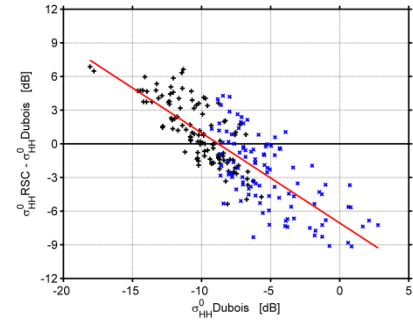


Figure 124 : Résidus du modèle de Dubois tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.

La Figure 125 présente le comportement des résidus du modèle de Dubois, tracés en fonction des différentes variables relatives aux conditions de surface, ou à la configuration du capteur.

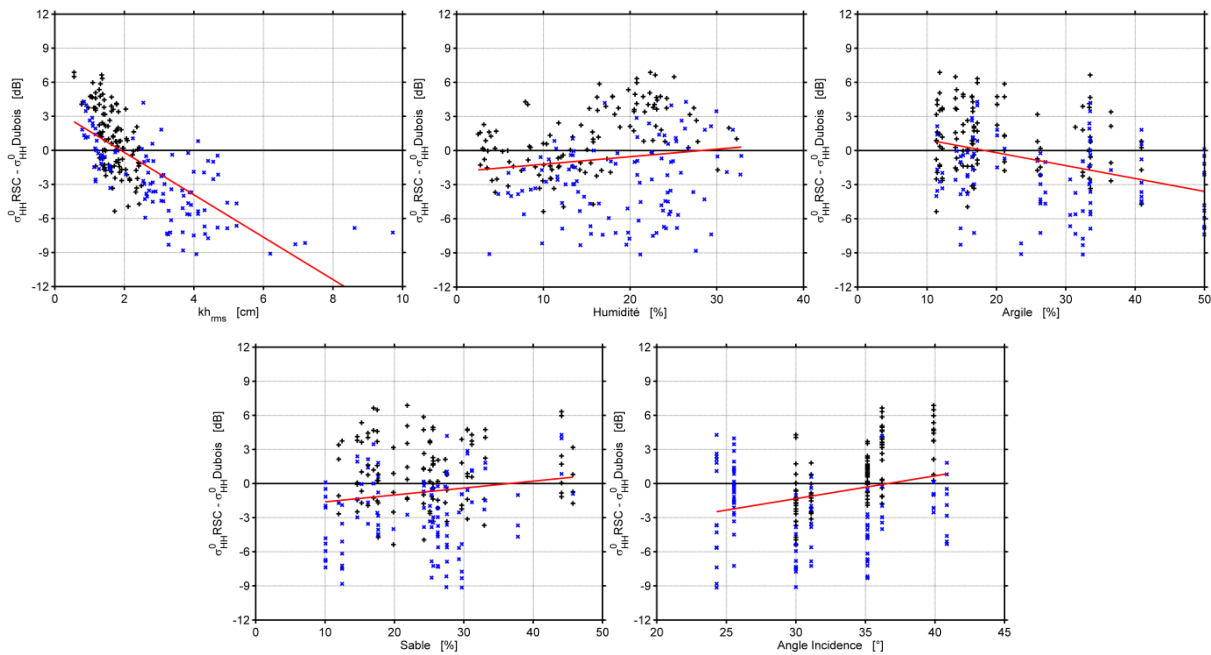


Figure 125 : Résidus du modèle de Dubois en bande C, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité, de la texture (teneurs en argile et en sable), et de l'angle d'incidence.

Les comportements des résidus vis-à-vis des différentes variables d'entrée du modèle sont opposés. Face à l'humidité de surface, à la teneur en sable ou à l'angle d'incidence, les résidus présentent une augmentation. La dynamique observée est au maximum de 3,3 dB, dans le cas de l'angle d'incidence. A l'inverse, les résidus montrent une décroissance avec la teneur en argile, et la hauteur quadratique moyenne. Les dynamiques sont alors plus prononcées, avec 4,4 dB vis-à-vis de l'argile et surtout 17,1 dB face au paramètre relatif à la rugosité. L'impact de ce paramètre est une nouvelle fois prédominant, comme dans le cas des autres modèles semi-empiriques.

Modèle IEM

Les résidus du modèle *IEM* sont en grande majorité compris dans un intervalle de plus ou moins 9 dB, avec une valeur moyenne de -0,55 dB. Les valeurs hors domaine de validité du modèle (en bleu) présentent une dispersion plus importante que les simulations respectant les limites définies par l'auteur (Figure 126). Comme dans le cas des modèles semi-empiriques, les résidus sont reliés aux valeurs simulées par une pente de -0,76, et présentent donc une tendance décroissante prononcée.

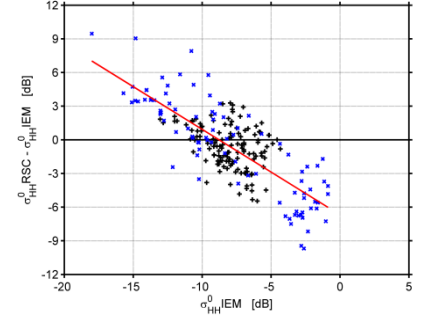


Figure 126 : Résidus du modèle *IEM* tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.

La Figure 127 présente les résidus du modèle *IEM*, tracés en fonction des différentes variables d'entrée, relatives aux conditions de surface, ou à la configuration du capteur.

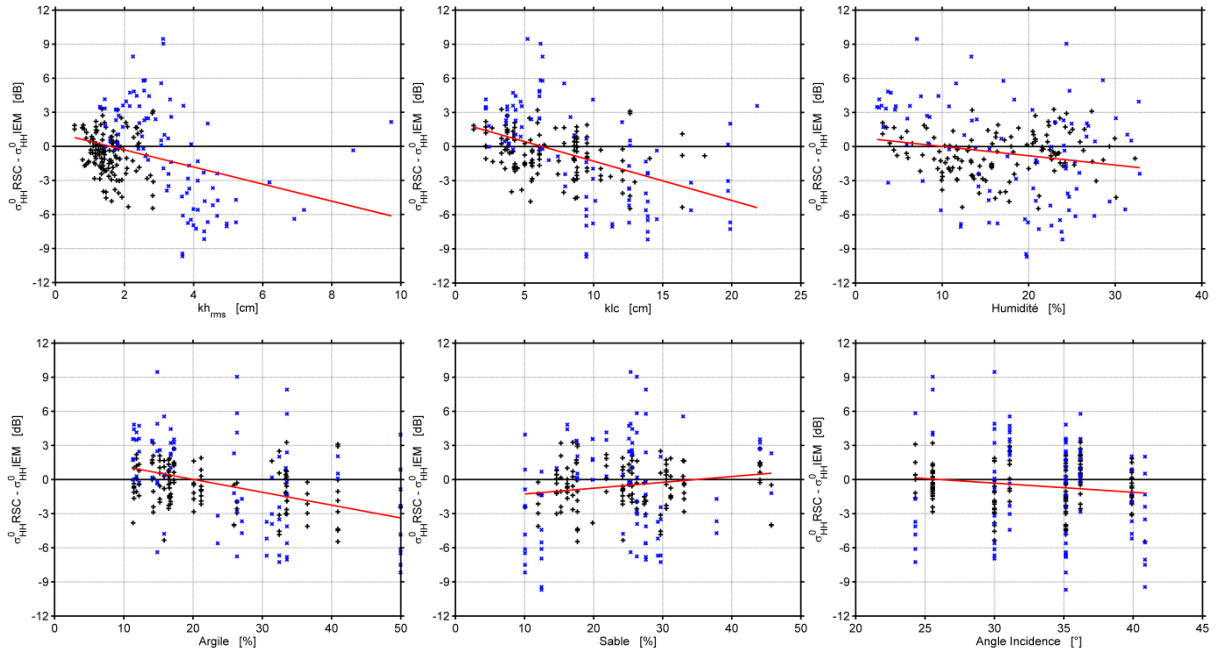


Figure 127 : Résidus du modèle *IEM* en bande C, tracés en fonction des paramètres relatifs à la rugosité (hauteur quadratique moyenne et longueur de corrélation), à l'humidité de surface, à la texture (teneur en argile et en sable), et à l'angle d'incidence.

Les résidus présentent des tendances décroissantes vis-à-vis des différentes variables d'entrée du modèle, excepté face à la teneur en sable. La dynamique alors observée atteint 1,8 dB, sur l'intervalle de variation du paramètre. Concernant les autres variables, la dynamique est minimale avec l'angle d'incidence, où elle est de 1,3 dB. Elle est maximale face aux paramètres relatifs à la rugosité (hauteur quadratique moyenne ou longueur de corrélation), où elle avoisine les 7 dB.

Modèle IEM optimisé

Les conséquences des modifications proposées par Baghdadi, s'illustrent par une réduction de la dispersion des résidus, qui sont compris entre -7, et 4 dB (Figure 128). Un biais persiste toutefois, comme en témoignent les valeurs majoritairement négatives (correspondant à une surestimation des coefficients de rétrodiffusion), et la valeur moyenne des résidus de -1,21 dB. D'autre part, la décroissance entre les résidus et les valeurs simulées est moins prononcée, la pente est alors de -0,35.

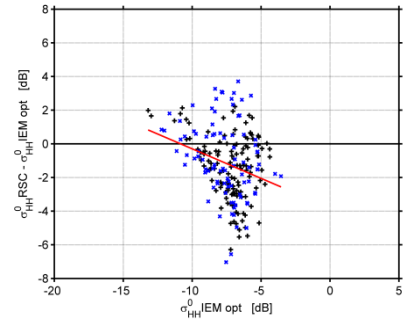


Figure 128 : Résidus du modèle IEM optimisé tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.

Les comportements des résidus du modèle IEM optimisé vis-à-vis des différentes variables d'entrée, sont différents de ceux observés avec la version originelle, comme le montre la Figure 129.

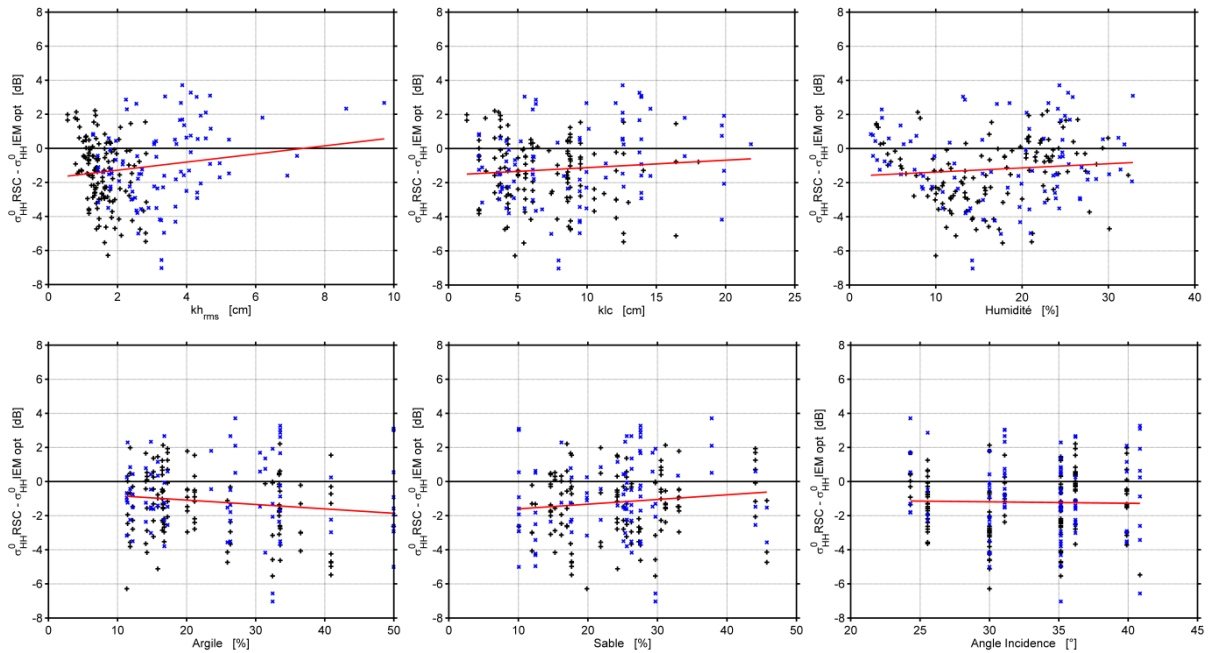


Figure 129 : Résidus du modèle IEM optimisé en bande C, tracés en fonction des paramètres relatifs à la rugosité (hauteur quadratique moyenne et longueur de corrélation), à l'humidité de surface, à la texture (teneur en argile et en sable), et à l'angle d'incidence.

Les tendances entre les résidus et les variables disparaissent, excepté face à la hauteur quadratique moyenne. Pour cette variable, la décroissance observée avec la version originelle laisse place à une augmentation des valeurs des résidus, de 0,24 dB par cm, soit un effet de 2,2 dB sur l'intervalle de variation observé. Concernant les autres descripteurs, les pentes sont minimales, induisant au maximum un décalage d'un dB sur les valeurs des résidus. Une meilleure prise en compte de la rugosité dans le modèle (en particulier de la longueur de corrélation) gomme la plupart des tendances, toutefois les valeurs de résidus restent associées un biais important.

4.3. Résultats de modélisation en bande L

4.3.1. Performances des modèles

Le Tableau 11 présente les indicateurs statistiques, résultats de la comparaison entre les coefficients de rétrodiffusion simulés en polarisation *HH*, et ceux issus des images Alos. Pour chacun des modèles (Oh 1992 et 2004, Dubois, et *IEM*), les performances statistiques sont estimées en considérant différentes ensembles de données d'entrée (E_1 à E_4).

Les différentes approches semi-empiriques et physiques sont associées à des coefficients de détermination compris entre 0,3 et 0,64. Quelque soit le modèle considéré, les erreurs sur les coefficients de rétrodiffusion sont acceptables, elles sont inférieures à 25% (soit 3,20 dB). Les modèles d'Oh (version 1992 ou 2004) sous-estiment les valeurs des coefficients de rétrodiffusion, à l'inverse des modèles de Dubois et l'*IEM*. Il est à noter que l'évaluation des modèles en bande L est réalisée sur un nombre de données moins important que dans le cas des bandes X et C. Pour chacun des modèles, les simulations basées sur les différentes ensembles de données (E_1 à E_4 dans le Tableau 11) montrent que la prise en compte des **profils de rugosité érodés** offrent les meilleurs résultats (soit les données E_2 et E_3). Concernant les modèles d'Oh, le gain se traduit par une amélioration des valeurs de coefficient de détermination, qui passent de 0,4 à 0,64 au maximum. Pour les modèles de Dubois et l'*IEM*, ces changements s'accompagnent en outre d'une baisse de la *RMSE* et du biais. A l'inverse, la prise en compte de l'**humidité** corrigée (performances associées aux données E_1 et E_2), ou des valeurs de **texture** moyennes à la parcelle (comparaisons E_3 et E_4) modifient peu les résultats de simulation. Il est à noter que dans le cas de la bande L, l'effet de la correction des mesures d'humidité est minime (comme le montrent les résultats de la synchronisation des mesures d'humidité de surface avec les acquisitions satellites, section 4.1.3).

	n	RMSE [dB]	rRMSE [%]	R ²	Biais [dB]	a	b [dB]
Oh 1992							
E ₁	15	2,27	17	0,41	-1,15	0,87	-2,86
E ₂	15	2,24	17	0,40	-1,07	0,86	-2,93
E ₃	15	2,59	19	0,61	-1,94	1,16	0,15
E ₄	15	2,59	19	0,61	-1,94	1,16	0,14
Oh 2004							
E ₁	15	2,01	15	0,45	-1,32	0,69	-5,41
E ₂	15	1,95	15	0,45	-1,23	0,68	-5,46
E ₃	15	2,25	17	0,64	-1,88	0,89	-3,37
E ₄	15	2,25	17	0,64	-1,88	0,89	-3,37
Dubois							
E ₁	15	2,17	16	0,33	1,15	0,66	-3,44
E ₂	15	2,30	17	0,30	1,29	0,64	-3,59
E ₃	15	1,65	12	0,52	0,55	0,87	-1,24
E ₄	15	1,65	12	0,52	0,54	0,87	-1,25
IEM							
E ₁	15	3,17	24	0,40	1,56	1,20	4,29
E ₂	15	3,20	24	0,39	1,66	1,19	4,20
E ₃	15	2,58	19	0,56	0,80	1,42	6,44
E ₄	15	2,57	19	0,56	0,80	1,42	6,43

Tableau 11 : Performances statistiques associées à la mise en œuvre des différents modèles en bande L (en polarisation HH). Les simulations sont effectuées sur la base des différents ensembles de données (E1 à E4). Les paramètres relatifs à la droite de régression sont notés a et b.

Avec des valeurs supérieures à 0,6, les modèles d'Oh présentent les valeurs maximales concernant les coefficients de détermination. Les valeurs de biais sont très proches, voisines de -1,9 dB. Elles sont associées à des erreurs inférieures à 20% (soit 2,59 dB au maximum), sur l'estimation des coefficients de rétrodiffusion. Concernant le modèle de Dubois, il présente des valeurs de biais et de *RMSE* minimales, soit respectivement 0,54 et 1,65 dB. Enfin, les résultats basés sur le modèle *IEM* sont comparables à ceux obtenus avec les modèles semi-empiriques, avec un biais de 0,8 dB et une *RMSE* de 2,6 dB.

La Figure 130 illustre la comparaison entre les mesures et les simulations issues des différents modèles, basées sur l'ensemble *E₄* (à savoir les valeurs des paramètres d'entrée les mieux corrigées à priori). Comme précédemment, les figurés de couleurs noires et bleues distinguent respectivement les simulations dans et hors domaines de validité des modèles (tels que définis par les auteurs). Les données servant à l'évaluation des différents modèles sont associées à des conditions moins hétérogènes que dans le cas des bandes X ou C. Néanmoins, l'application des modèles d'Oh est théoriquement limitée 60% (n=9, pour la version de 1992) et 66% (n=10, pour celle de 2004) des données collectées. Concernant les approches de Dubois et l'*IEM*, les conditions observées ne sont pas restrictives.

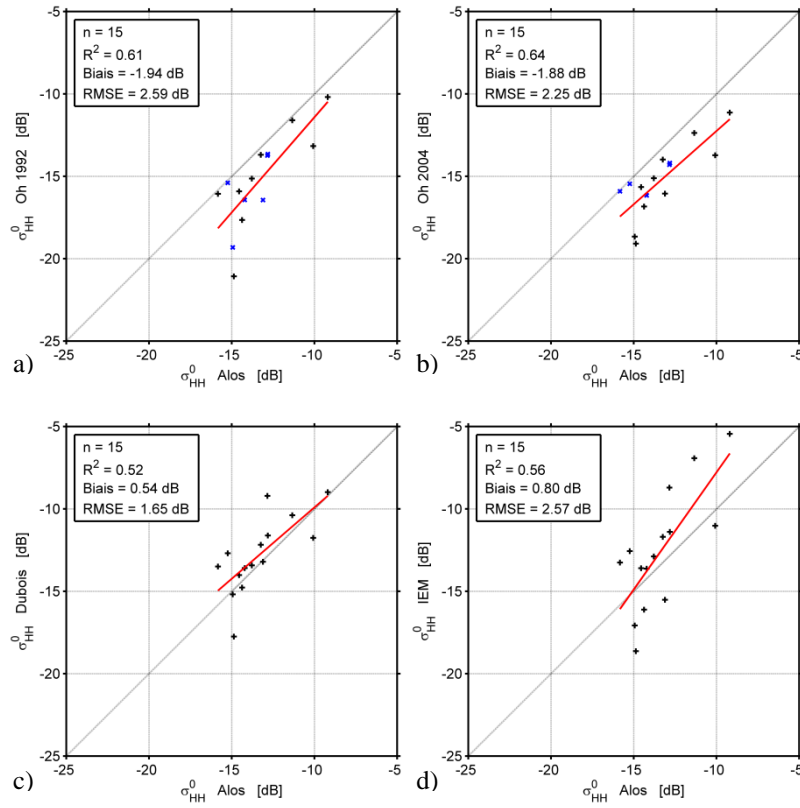


Figure 130 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus des images satellites Alos (bande L, polarisation HH), à ceux simulés par les modèles d'Oh (1992 a), et 2004 b)), de Dubois c) et au modèle IEM d). Les figurés noirs et bleus distinguent les simulations dans et hors domaine de validité des modèles.

4.3.2. Analyse des résidus

Modèle d'Oh 1992

Le modèle d'Oh 1992 sous-estime les coefficients de rétrodiffusion, comme en témoignent les valeurs positives des résidus (Figure 131), et la moyenne de 1,94 dB. Face aux valeurs simulées, les résidus montrent une tendance décroissante, avec une pente de -0,47. Les simulations hors domaine de validité du modèle (en bleu) sont confondues avec celles respectant les limites définies par Oh.

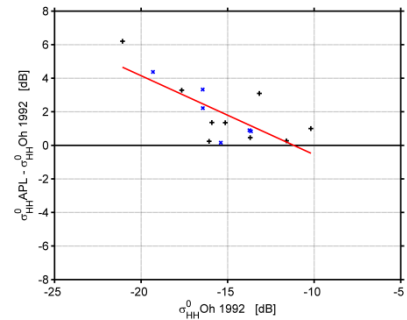


Figure 131 : Résidus du modèle d'Oh 1992 tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.

La Figure 132 présente le comportement des résidus du modèle d'Oh 1992, tracés en fonction des différentes variables relatives aux conditions de surface, ou à la configuration du capteur. Face aux différentes variables d'entrée, les résidus présentent des tendances décroissantes, excepté vis-à-vis de la teneur en sable. Dans ce cas, l'augmentation des valeurs avoisine alors les 3,5 dB, sur l'intervalle de variation du paramètre. Cette dynamique est supérieure à celles observée avec les autres variables d'entrée, qui se traduit par une diminution maximale de 2,8 dB avec l'humidité de surface.

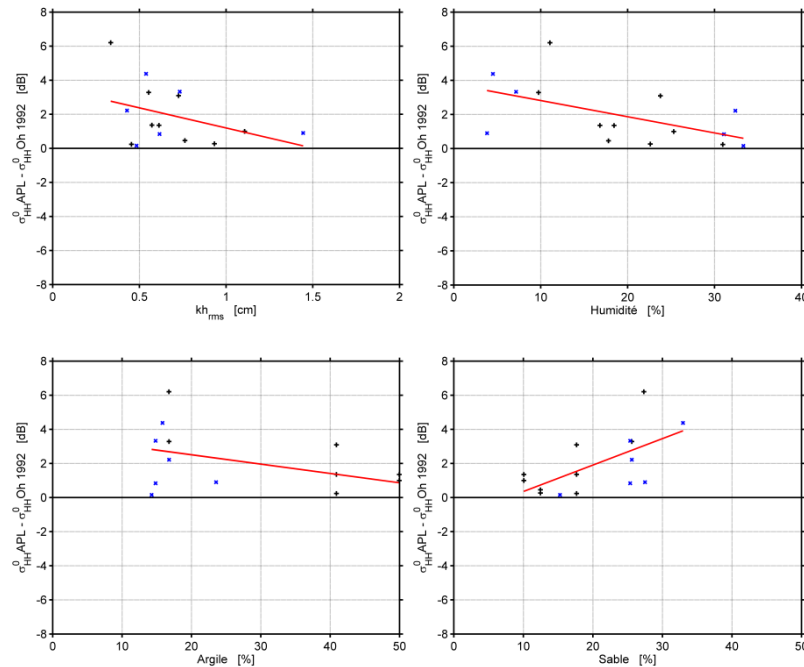


Figure 132 : Résidus du modèle d'Oh 1992 en bande L, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité, et de la texture (teneurs en argile et en sable).

Modèle d'Oh 2004

Comme précédemment, le modèle d'Oh 2004 sous-estime les coefficients de rétrodiffusion (Figure 133). Les résidus sont positifs, caractérisés par une valeur moyenne de 1,88 dB. La tendance décroissante entre les résidus et les coefficients de rétrodiffusion simulés est moins prononcée, comme en témoigne la pente de -0,28.

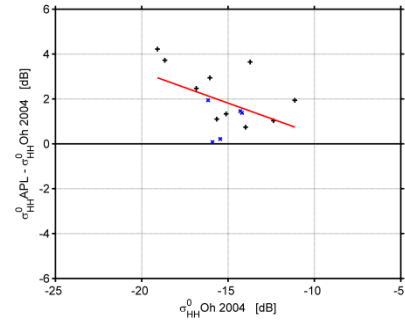


Figure 133 : Résidus du modèle d'Oh 2004 tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.

La Figure 134 présente le comportement des résidus du modèle d'Oh 2004, tracés en fonction de deux variables relatives aux conditions de surface, à savoir la hauteur quadratique moyenne et l'humidité de surface. Les résidus montrent des tendances décroissantes. Ce comportement est peu prononcé face au paramètre relatif à la rugosité de surface. Concernant l'humidité de surface, la diminution atteint 2 dB, sur la gamme de valeurs observées.

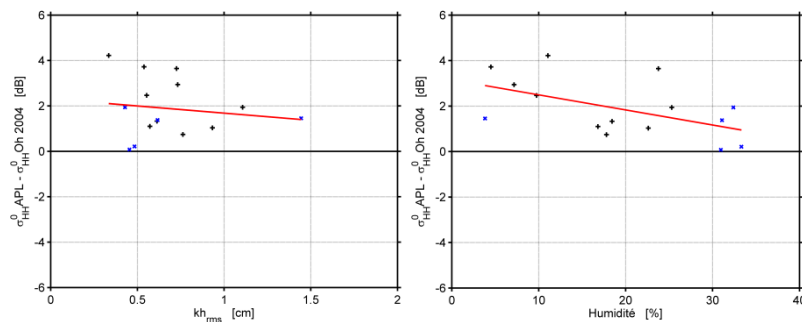


Figure 134 : Résidus du modèle d'Oh 2004 en bande L, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, et de l'humidité.

Modèle de Dubois

Les résidus du modèle de Dubois fluctuent autour de la valeur moyenne égale à -0,54 dB, dans un intervalle allant de -3,6 à 2,9 dB (Figure 135). Face aux coefficients de rétrodiffusion simulés, ils présentent une tendance décroissante, avec une pente de -0.40.

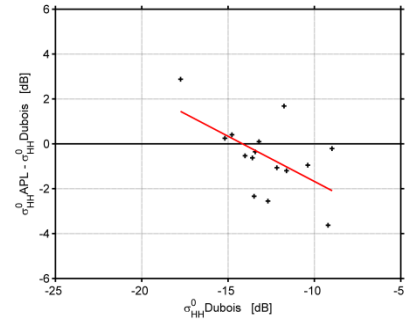


Figure 135 : Résidus du modèle de Dubois tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.

La Figure 136 présente le comportement des résidus du modèle de Dubois, tracés en fonction des différentes variables relatives aux conditions de surface. Les tendances face aux variables relatives à la texture sont quasi-nulles, avec un impact inférieur à un dB. Face à l'humidité de surface, la diminution observée dépasse légèrement 1 dB. La décroissance maximale est observée avec la hauteur quadratique moyenne, avec une dynamique de -2.39 dB par cm, correspondant à 2,7 dB sur l'intervalle de variation présenté ci-dessous.

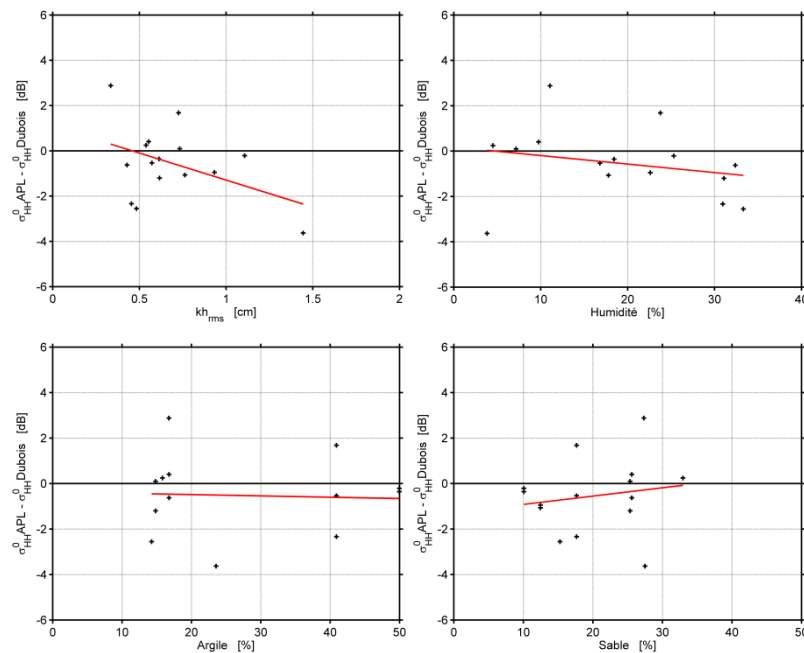


Figure 136 : Résidus du modèle de Dubois en bande L, tracés en fonction de la hauteur quadratique moyenne, de l'humidité, et de la texture (teneurs en argile et en sable).

Modèle IEM

Les résidus du modèle IEM sont associés aux valeurs simulées par une forte tendance décroissante (Figure 137). Le coefficient directeur de la droite reliant ces deux variables est de -0,61. La moyenne de la différence entre mesure et modèle est légèrement inférieure à zéro, soit -0,8 dB. Les valeurs des résidus sont importantes, comprises dans l'intervalle allant de -4,4 à 3,8 dB.

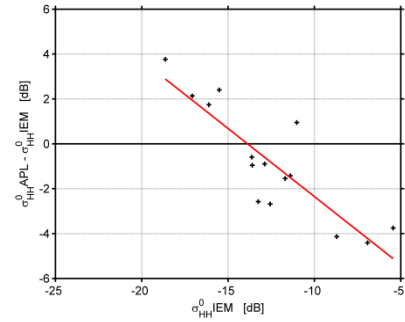


Figure 137 : Résidus du modèle IEM tracés en fonction des coefficients de rétrodiffusion simulés.

La Figure 138 présente les résidus du modèle IEM, tracés en fonction des différentes variables d'entrée, relatives aux conditions de surface. Les résidus présentent des tendances décroissantes vis-à-vis des différentes variables d'entrée du modèle, sauf face à la teneur en sable, où l'augmentation atteint 4,5 dB, sur l'intervalle de variation du paramètre. Concernant les autres variables, la diminution des valeurs des résidus est minimale face à la teneur en sable, où elle est proche de 2,9 dB. Elle est maximale face aux paramètres relatifs à la rugosité (soit la hauteur quadratique moyenne ou la longueur de corrélation), où elle avoisine les 6 dB.

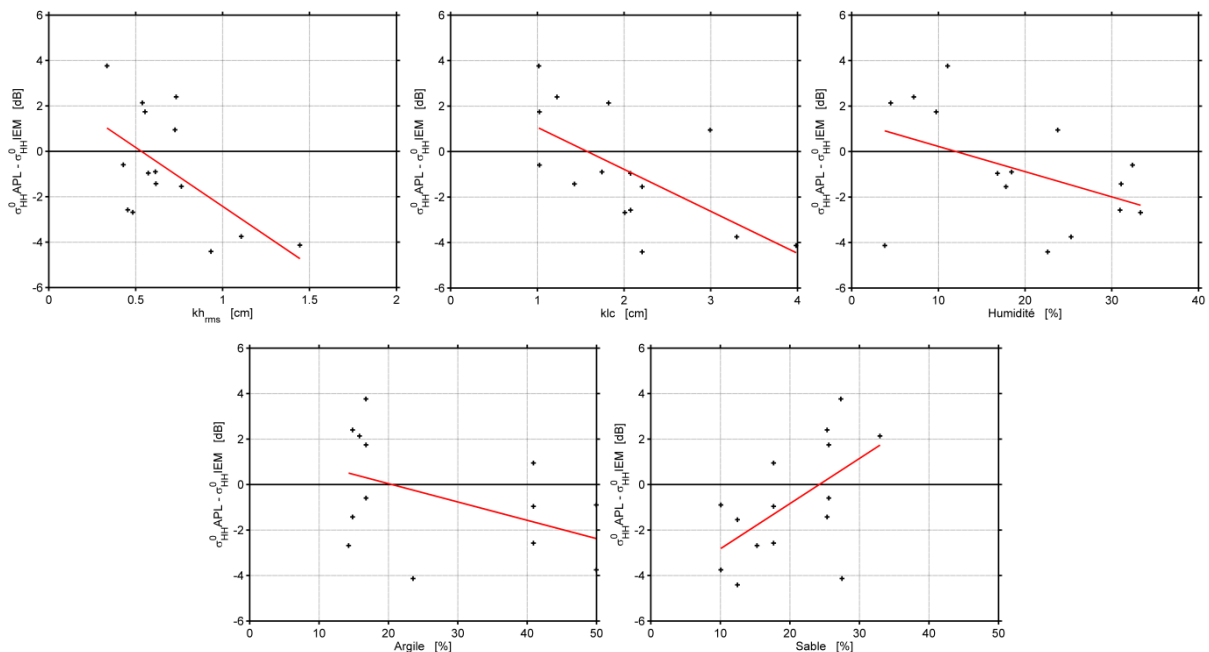


Figure 138 : Résidus du modèle IEM en bande L, tracés en fonction des paramètres relatifs à la rugosité (hauteur quadratique moyenne et longueur de corrélation), à l'humidité de surface, et à la texture (teneur en argile et en sable).

5. AMELIORATION DES MODELES

L'évaluation des différents modèles de rétrodiffusion a mis en relief l'existence de comportements particuliers entre les résidus et certaines variables d'entrée. Les différents formalismes ne prennent pas en compte l'intégralité de l'information portée par ces variables, afin de simuler les coefficients de rétrodiffusion. Cette partie propose de réduire cette limitation en intégrant aux modèles les « tendances » vis-à-vis des résidus observés précédemment.

Pour chacune des fréquences, les modèles sont corrigés des comportements vis-à-vis des résidus, lorsque l'effet de la variable biophysique est significatif (impact supérieur à 1 dB). Au final, les comportements des résidus pris en compte pour chaque modèle, et chaque fréquence, sont notés dans le Tableau 12. Les « nouveaux » modèles optimisés sont appelés par la suite : $Oh1992_{OPT}$, $Oh2004_{OPT}$ et $Dubois_{OPT}$.

Modèles Fréquences	h_{rms}	Humidité	Argile	Sable	Ang Inc
Oh1992					
Bande X	O	O	N	N	O
Bande C	O	O	N	N	N
Bande L	O	O	N	O	N
Oh2004					
Bande X	O	O	-	-	O
Bande C	O	O	-	-	N
Bande L	O	O	-	-	N
Dubois					
Bande X	O	N	N	N	O
Bande C	O	O	N	N	O
Bande L	O	O	N	N	N

Tableau 12 : Récapitulatif des comportements pris en compte dans la modification des modèles semi-empiriques (O pour oui, N pour non).

L'effort est porté sur les modèles semi-empiriques, pour les raisons suivantes : (i) les tendances entre résidus et les variables d'entrée sont plus marquées que dans le cas du modèle physique, (ii) une optimisation du modèle *IEM*, basée sur une approche empirique, est déjà proposée par (Baghdadi et al., 2002; Baghdadi et al., 2004; Baghdadi et al., 2006; Baghdadi et al., 2011a; Baghdadi et al., 2011b).

Afin de conserver une indépendance dans les résultats, la base de données d'entrée est divisée en deux parties en bandes C et X. Les deux séries, notées E_{APP} et E_{VAL} , sont déterminées par un tirage aléatoire, et regroupent la moitié des mesures disponibles (soit $n=283/2$ pour la bande X, et $n=222/2$ pour la bande C). La première série sert à établir la correction des modèles, alors que la seconde est utilisée pour la validation. En bande L, le nombre restreint d'échantillon ($n=15$) ne permet pas la séparation en deux groupes distincts. Les phases d'apprentissage et de validation sont donc regroupées sur l'ensemble du jeu de données.

5.1. Résultats en bande X

Les modèles semi-empiriques proposés par Oh (versions de 1992 et 2004) sont corrigés des « tendances » vis-à-vis de l'angle d'incidence (Figure 139a), de l'humidité de surface (Figure 139b) et de la hauteur quadratique moyenne (Figure 139c). Dans le cas de l'humidité de surface, deux comportements sont considérés. Pour les valeurs inférieures à 16%, une décroissance linéaire est prise en compte, au-delà de ce seuil, un biais moyen (Figure 139c). Concernant le modèle de Dubois, les modifications du modèle portent sur la prise en compte de la tendance vis-à-vis de l'angle d'incidence, et de la décroissance des résidus avec la hauteur quadratique moyenne.

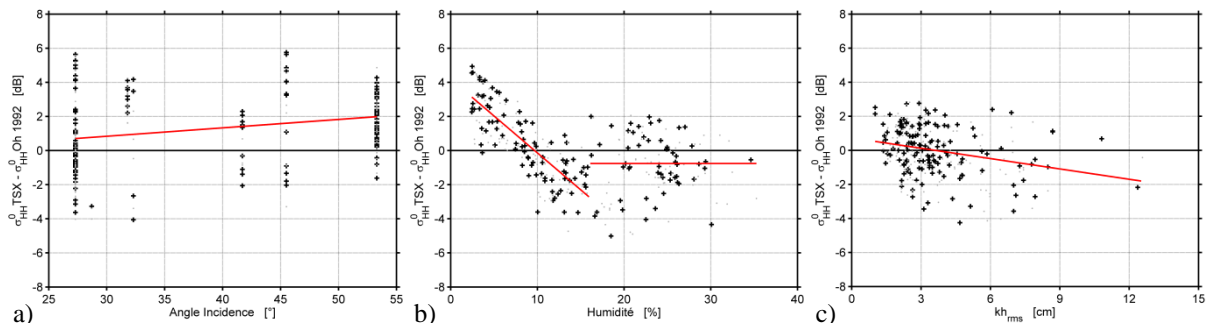


Figure 139 : Exemples de comportements des résidus pris en compte pour la modification des modèles semi-empiriques (cas du modèle d'Oh 1992).

Les impacts des corrections sont évalués de manière statistique sur les échantillons d'apprentissage et de validation (E_{APP} et E_{VAL} dans le Tableau 13). Les indicateurs statistiques témoignent de l'amélioration des simulations des différents modèles. Les coefficients de rétrodiffusion atteignent 0,5 (contre 0,34 en moyenne avant modification). Quel que soit le modèle considéré, les erreurs sur les coefficients de rétrodiffusion sont inférieures à 1,5 dB (soit 15%). Avant correction, ces erreurs étaient comprises entre 2,33 et 4,79 dB, selon le modèle considérés. Enfin, les performances statistiques obtenues durant les phases d'apprentissage et de validation des modèles sont très proches. La différence maximale est observée avec le modèle de Dubois, où les coefficients de détermination associés au modèle initial sont de 0,37 pour les données servant à l'apprentissage, et 0,30 pour les données de validation. Après modification, les valeurs des coefficients de détermination sont quasi-similaires. Pour chacun des modèles, seules les valeurs de biais distinguent les échantillons d'apprentissage et ceux de validation. Ces résultats illustrent d'une part la similitude entre les deux séries d'échantillons, et d'autre part la robustesse des modifications.

Modèles	Données	n	RMSE [dB]	rRMSE [%]	R ²	Biais [dB]	a	b [dB]
Oh1992 _{INI}	E _{APP}	142	2,55	27	0,33	-1,33	0,75	-3,66
Oh1992 _{INI}	E _{VAL}	141	2,33	25	0,36	-0,90	0,83	-2,52
Oh1992 _{OPT}	E _{APP}	142	1,39	15	0,53	0,00	0,61	-3,62
Oh1992 _{OPT}	E _{VAL}	141	1,41	15	0,53	0,30	0,68	-2,69
Oh2004 _{INI}	E _{APP}	142	2,69	29	0,34	-0,01	0,97	-0,31
Oh2004 _{INI}	E _{VAL}	141	2,74	29	0,34	0,51	1,01	0,61
Oh2004 _{OPT}	E _{APP}	142	1,45	16	0,50	0,00	0,61	-3,63
Oh2004 _{OPT}	E _{VAL}	141	1,44	15	0,51	0,31	0,67	-2,76
Dubois _{INI}	E _{APP}	142	4,57	49	0,37	-0,26	1,68	6,08
Dubois _{INI}	E _{VAL}	141	4,79	51	0,30	0,33	1,60	5,93
Dubois _{OPT}	E _{APP}	142	1,46	16	0,47	0,00	0,40	-5,60
Dubois _{OPT}	E _{VAL}	141	1,40	15	0,49	0,20	0,42	-5,17

Tableau 13 : Performances statistiques associées à la mise en œuvre des différents modèles en bande X (en polarisation HH), avant et après optimisation (respectivement en gris et noir). L'évaluation est basée sur les échantillons ayant servi à la détermination des corrections (E_{APP}), ou indépendant (E_{VAL}).

La Figure 140 illustre la comparaison entre les coefficients de rétrodiffusion simulés et ceux issus des images satellites. Deux cas sont superposés: simulations avec le modèle initial X_{INI} et simulations avec les modèles optimisés X_{OPT} (X correspondant au modèle d'Oh 1992, Oh 2004 ou Dubois). Cette figure permet de voir clairement la réduction de la dispersion des modèles optimisés avec un impact très marqué pour le modèle de Dubois en particulier. Les valeurs statistiques des figures correspondent aux modèles optimisés sur les échantillons de validations (X_{OPT} , E_{VAL}).

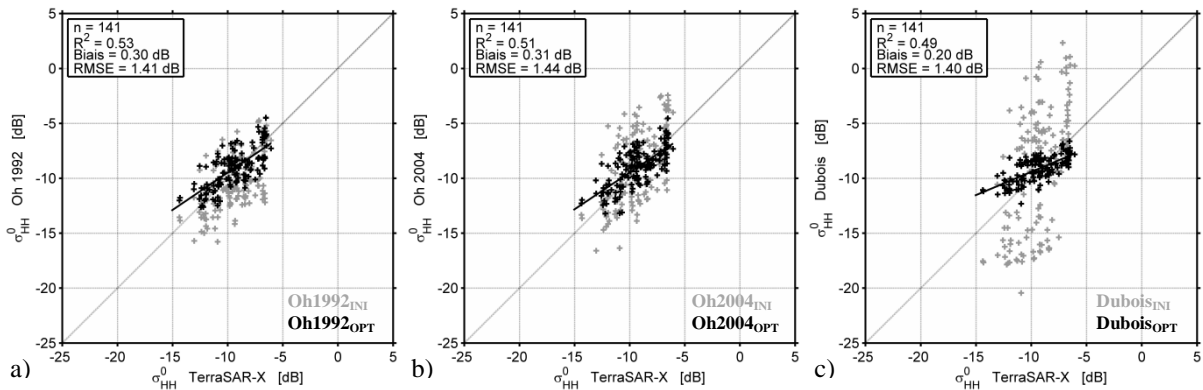


Figure 140 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus des images satellites TerraSAR-X (bande X, polarisation HH), à ceux simulés par les modèles d'Oh (1992 a), et 2004 b) et de Dubois c). Les figures gris et noir distinguent respectivement les simulations réalisées avec les versions initiales et optimisées.

Outre l'amélioration des performances statistiques des modèles, la méthode mise en œuvre permet d'étendre de manière considérable les domaines de validité (Tableau 14). En effet, ce domaine est quasi-doublé dans le cas de la rugosité pour les modèles d'Oh, avec une valeur maximale de kh_{rms} qui passe de 6,00 à 12,57 cm (correspondant à une h_{rms} de 6,22 cm en bande X). Concernant l'humidité de surface, la gamme de valeur est également étendue aux mesures comprises entre 2,4 et 35,3%. Les limites étaient plus restrictives concernant les modèles d'Oh, avec des intervalles allant de 9 à 31% (pour la version de 1992), et de 4 à 29,1% (pour la version

de 2004). Ces résultats sont valides pour des données acquises par satellites, à des angles d'incidence compris entre 27,3° et 53,3°.

Modèles	kh _{rms} [cm]		h _{rms} [cm]		Humidité [%]		Ang Inc [°]	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Oh1992 _{INI}	0,10	6,00	0,05	2,97	9,0	31,0	10,0	70,0
Oh1992 _{OPT}	1,02	12,57	0,50	6,22	2,4	35,3	27,3	53,3
Oh2004 _{INI}	0,13	6,98	0,06	3,45	4,0	29,1	10,0	70,0
Oh2004 _{OPT}	1,02	12,57	0,50	6,22	2,4	35,3	27,3	53,3
Dubois _{INI}	-	2,50	-	1,24	-	35	30,0	-
Dubois _{OPT}	1,02	12,57	0,50	6,22	2,4	35,3	27,3	53,3

Tableau 14 : Comparaison des domaines de validité obtenus pour les modèles initiaux et optimisés.

5.2. Résultats en bande C

Les modèles semi-empiriques proposés par Oh (versions de 1992 et 2004) sont corrigés des tendances vis-à-vis de la hauteur quadratique moyenne et de l'humidité de surface. Dans le cas de l'humidité de surface, deux comportements sont considérés (comme précédemment pour la bande X). Pour les valeurs inférieures à 9%, une décroissance linéaire est prise en compte, au-delà de ce seuil, un biais moyen. Concernant le modèle de Dubois, les modifications portent sur la prise en compte de l'angle d'incidence, de la hauteur quadratique moyenne et de l'humidité de surface.

Comme précédemment pour la bande X, l'évaluation de la prise en compte des différents biais est basée sur les performances statistiques présentées dans le Tableau 15. Après modifications, les différents modèles présentent des performances similaires. Les coefficients de détermination, médiocres avant les modifications (compris entre 0,10 et 0,20), atteignent des valeurs proches de 0,40. L'erreur sur les coefficients de rétrodiffusion est réduite à des valeurs inférieures à 2 dB (soit 20% en valeur relative). Avant correction, ces erreurs étaient comprises entre 2,16 et 3,66 dB selon les modèles considérés. Les performances statistiques obtenues durant les phases d'apprentissage et de validation des modèles sont très proches, montrant la similitude entre les deux séries d'échantillons, et la robustesse des modifications. Après modification, les différences maximales entre les deux séries de données sont associées au modèle d'Oh 2004, avec des coefficients de détermination de 0,33 contre 0,40, et des erreurs sur l'estimation des coefficients de rétrodiffusion de 1,89 et 1,73 dB.

Modèles	Données	n	RMSE [dB]	rRMSE [%]	R ²	Biais [dB]	a	b [dB]
Oh1992 _{INI}	E _{APP}	111	2,37	28	0,20	-0,13	0,43	-4,99
Oh1992 _{INI}	E _{VAL}	111	2,16	25	0,20	0,12	0,36	-5,45
Oh1992 _{OPT}	E _{APP}	111	1,79	21	0,39	0,00	0,33	-5,67
Oh1992 _{OPT}	E _{VAL}	111	1,74	20	0,40	0,04	0,33	-5,77
Oh2004 _{INI}	E _{APP}	111	2,69	32	0,19	0,05	0,52	-4,01
Oh2004 _{INI}	E _{VAL}	111	2,47	28	0,19	0,33	0,46	-4,33
Oh2004 _{OPT}	E _{APP}	111	1,89	22	0,33	0,00	0,40	-5,09
Oh2004 _{OPT}	E _{VAL}	111	1,73	20	0,40	0,07	0,43	-4,91
Dubois _{INI}	E _{APP}	111	3,66	43	0,10	0,41	0,52	-3,71
Dubois _{INI}	E _{VAL}	111	3,66	42	0,10	1,10	0,49	-3,35
Dubois _{OPT}	E _{APP}	111	1,88	22	0,37	0,00	0,50	-4,25
Dubois _{OPT}	E _{VAL}	111	1,74	20	0,42	0,08	0,54	-3,97

Tableau 15 : Performances statistiques associées à la mise en œuvre des différents modèles en bande C (en polarisation HH), avant et après optimisation (respectivement en gris et noir). L'évaluation est basée sur les échantillons ayant servi à la détermination des corrections (E_{APP}), ou indépendant (E_{VAL}).

La Figure 141 illustre la comparaison entre les coefficients de rétrodiffusion simulés et ceux issus des images satellites. Deux cas sont superposés: simulations avec le modèle initial X_{INI} et simulations avec les modèles optimisés X_{OPT} (X correspondant au modèle d'Oh 1992, Oh 2004 ou Dubois). Cette figure permet de voir clairement la réduction de la dispersion des modèles optimisés, avec une nouvelle fois un impact maximal pour

le modèle de Dubois. Les valeurs statistiques des figures correspondent aux modèles optimisés sur les échantillons de validations (X_{OPT} , E_{VAL}).

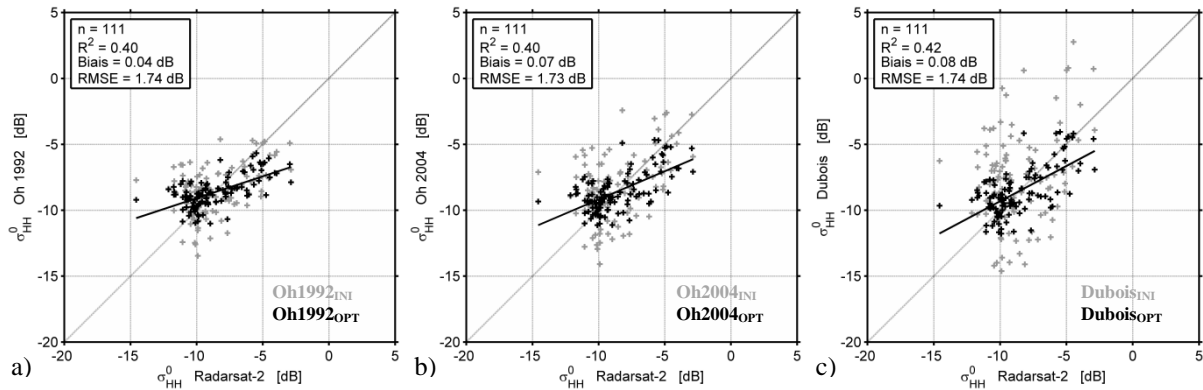


Figure 141 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus des images satellites Radarsat-2 (bande C, polarisation HH), à ceux simulés par les modèles d'Oh (1992 a), et 2004 b)) et de Dubois c). Les figurés gris et noir distinguent respectivement les simulations réalisées avec les versions initiales et optimisées.

Les domaines de validité des différents modèles (présentés dans le Tableau 16) sont, comme pour la bande X, étendus à une plus large gamme de conditions de surface. Concernant la rugosité, les valeurs de kh_{rms} couvrent un intervalle allant de 0,55 à 9,72 cm (correspondant des valeurs de h_{rms} comprises entre 0,49 et 8,59 cm en bande C). Parmi les différents modèles initiaux, la limite maximale était offerte par le modèle d'Oh 2004, avec une valeur de 6,98 cm. Dans le cas de l'humidité de surface, la gamme de valeur est également étendue aux mesures comprises entre 2,5 et 32,8%, concernant les modèles d'Oh. Ces performances sont valides pour des données satellites, acquises en bande C, à des angles d'incidence compris entre 24,3° et 40,9°.

Modèles	kh_{rms} [cm]		h_{rms} [cm]		Humidité [%]		Ang Inc [°]	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Oh1992 _{INI}	0,10	6,00	0,09	5,31	9,0	31,0	10,0	70,0
Oh1992 _{OPT}	0,55	9,72	0,49	8,59	2,5	32,8	24,3	40,9
Oh2004 _{INI}	0,13	6,98	0,11	6,17	4,0	29,1	10,0	70,0
Oh2004 _{OPT}	0,55	9,72	0,49	8,59	2,5	32,8	24,3	40,9
Dubois _{INI}	-	2,50	-	2,21	-	35,0	30,0	-
Dubois _{OPT}	0,55	9,72	0,49	8,59	2,5	32,8	24,3	40,9

Tableau 16 : Comparaison des domaines de validité obtenus pour les modèles initiaux et optimisés.

5.3. Résultats en bande L

Les modèles semi-empiriques proposés par Oh 2004 et Dubois sont corrigés des tendances vis-à-vis de l'humidité de surface et de la hauteur quadratique moyenne. Dans le cas de la version de 1992, les modifications prennent également en compte le comportement vis-à-vis de la teneur en sable.

L'évaluation de la prise en compte des différents biais au sein des approches semi-empiriques est basée sur les performances statistiques présentées dans le Tableau 17. L'amélioration des résultats se traduit par une augmentation des valeurs de coefficients de détermination, ils dépassent 0,70 dans le cas des modèles d'Oh (contre 0,64 au maximum avant la correction). L'erreur sur les estimations des coefficients de rétrodiffusion est réduite à des valeurs inférieures à 1 dB pour ces mêmes modèles, à 1,30 dB pour le modèle de Dubois. Ces résultats sont à relativiser, le nombre d'échantillons étant faible. Dans le cas de la bande L, une base de données plus étendue est nécessaire, afin de valider l'approche.

Modèles	Données	n	RMSE [dB]	rRMSE [%]	R ²	Biais [dB]	a	b
Oh1992 _{INI}	E _{APP}	15	2,59	19	0,61	-1,94	1,16	0,14
Oh1992 _{OPT}	E _{APP}	15	0,99	7	0,71	0,00	0,68	-4,26
Oh2004 _{INI}	E _{APP}	15	2,25	17	0,64	-1,88	0,89	-3,37
Oh2004 _{OPT}	E _{APP}	15	0,98	7	0,72	0,00	0,73	-3,63
Dubois _{INI}	E _{APP}	15	1,65	12	0,52	0,54	0,87	-1,25
Dubois _{OPT}	E _{APP}	15	1,30	10	0,51	0,00	0,57	-5,68

Tableau 17 : Performances statistiques associées à la mise en œuvre des différents modèles en bande L (en polarisation HH), avant et après optimisation (respectivement en gris et noir).

La Figure 142 illustre la comparaison entre les coefficients de rétrodiffusion simulés et ceux issus des images satellites. Les estimations des coefficients de rétrodiffusion issues des modèles initiaux et optimisés sont superposées. La réduction de la dispersion est clairement visible pour chacun des modèles. Elle est maximale dans le cas du modèle d'Oh 1992. Les valeurs statistiques correspondent aux modèles optimisés.

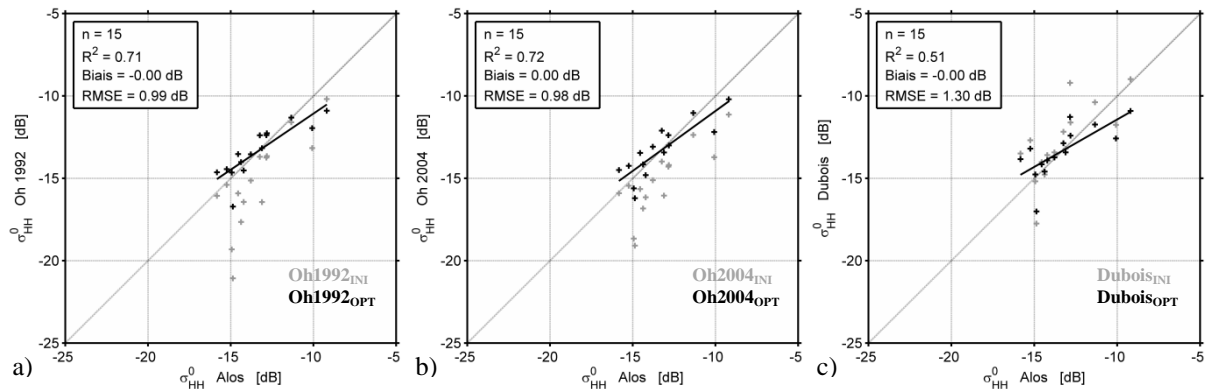


Figure 142 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus des images satellites Alos (bande L, polarisation HH), à ceux simulés par les modèles d'Oh (1992 a), et 2004 b) et de Dubois c). Les figurés gris et noir distinguent respectivement les simulations réalisées avec les versions initiales et optimisées.

L'échantillonnage restreint en bande L (n=15) ne permet pas d'étendre les domaines de validité des différents modèles, comme dans le cas des résultats obtenus en bandes X et C (Tableau 18). En effet, les niveaux de rugosité observés, avec des valeurs de kh_{rms} allant de 0,33 à 1,44 cm, sont circonscrits dans les limites définies par les auteurs. Dans le cas de l'angle d'incidence, les modifications sont limitées à une seule valeur, toutes les images étant acquises à 38,7°. Seule l'humidité de surface présente une gamme de valeur légèrement plus étendue que les modèles d'Oh initiaux, avec des mesures comprises entre 3,8 et 33,3%.

Modèles	kh_{rms} [cm]		h_{rms} [cm]		Humidité [%]		Ang Inc [°]	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Oh1992 _{INI}	0,10	6,00	0,38	22,56	9,0	31,0	10	70
Oh1992 _{OPT}	0,33	1,44	1,24	5,41	3,8	33,3	38,7	
Oh2004 _{INI}	0,13	6,98	0,49	26,24	4,0	29,1	10	70
Oh2004 _{OPT}	0,33	1,44	1,24	5,41	3,8	33,3	38,7	
Dubois _{INI}	-	2,50	-	9,40	-	35,0	30	-
Dubois _{OPT}	0,33	1,44	1,24	5,41	3,8	33,3	38,7	

Tableau 18 : Comparaison des domaines de validité obtenus pour les modèles initiaux et optimisés.

6. CONCLUSION

Ce chapitre traite de la modélisation électromagnétique sur sol nu, en s'appuyant sur les modèles les plus couramment utilisés dans le domaine des micro-ondes, à savoir : les modèles de Dubois, d'Oh (1992 et 2004) et l'Integral Equation Model (ou *IEM*). Ces modèles se distinguent par leurs formalismes, décrivant les processus de manière simplifiée (pour les modèles semi-empiriques), ou sur des bases physiques (dans le cas de l'*IEM*). Bien que largement utilisés dans le monde de la télédétection, ces modèles n'ont jamais été évalués de manière simultanée sur 3 domaines de fréquences (X, C et L), sur une même base de données de terrain. Les performances des modèles sont établies selon deux ensembles de données : celui contenu dans le domaine de validité théorique des modèles, et l'ensemble situé hors domaine de validité. Pour chacun de ces ensembles, l'impact de la précision des paramètres d'entrée a été évalué à l'échelle du paysage, ici constitué de données issues de 37 parcelles. L'analyse et l'amélioration des modèles sont issues de la prise en compte des résidus de modélisation.

Les meilleurs résultats de modélisation obtenus en bandes X et C (polarisation *HH*), sont issus des modèles semi-empiriques, et plus particulièrement avec le modèle d'Oh 1992. Ils restent cependant associés à une forte dispersion, avec au maximum des coefficients de détermination de 0,50 (en bande X) et une erreur quadratique moyenne proche de 2 dB. A ces fréquences, l'apport du modèle *IEM* pour l'estimation des coefficients de rétrodiffusion est quasi-nulle. En bande L, les résultats obtenus avec les différents modèles sont assez proches, avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,50 et une erreur minimale sur l'estimation des coefficients de rétrodiffusion de 1,65 dB, avec le modèle de Dubois.

L'impact de la précision des valeurs des paramètres d'entrée montre qu'une attention particulière doit être prise pour la collecte de l'humidité de surface (en bande X principalement) et de la rugosité (en bandes C et L). A l'inverse, à l'échelle d'une région, des valeurs moyennes de texture de surface suffisent.

L'analyse du comportement des résidus vis-à-vis des différents variables d'entrée permet d'identifier les paramètres mal pris en compte dans les modèles. Quelle que soit la fréquence considérée, des tendances marquées sont observées vis-à-vis de la rugosité, et de l'humidité de surface. Concernant ce dernier paramètre, dans le cas des modèles d'Oh, les résultats montrent deux comportements, avec un seuil variable en fonction de la longueur d'onde considérée. En bande X, les résidus présentent également de fortes tendances vis-à-vis de l'angle d'incidence sur l'ensemble des modèles. En bande L, les résidus montrent des comportements particuliers vis-à-vis de la teneur en sable du sol.

L'amélioration des modèles, issue de l'analyse des résidus, permet de réduire très fortement la dispersion des simulations et s'accompagne d'une extension des domaines de validité, à l'ensemble des conditions de surface caractérisées pendant la campagne *MCM'10*. Les coefficients de détermination passent de 0,35 à 0,50 en bande X, et de 0,20 à 0,40 en bande C. A ces fréquences, l'erreur sur l'estimation des coefficients de rétrodiffusion est inférieure à 2 dB. L'amélioration est également observée en bande L, avec des coefficients de détermination atteignant les 0,70 et une erreur de 1 dB. L'extension des domaines de validité est notable en bandes X et C, avec des valeurs de kh_{rms} maximales qui atteignent respectivement 12,57 et 9,72 cm, et des bornes d'humidité moins restrictives (comprises entre 2,4 à 35,3% en bande X, et entre 2,5 à 32,8% en bande C). Toutefois, ces résultats

restent médiocres, notamment en vue d'une inversion des paramètres de surface. Une alternative repose par conséquent sur la mise en place d'un nouveau modèle, combinaison des approches empiriques testées, ou sur une méthode statistique, en tirant partie des conditions contrastées observées durant la campagne expérimentale (vis-à-vis des capteurs satellites et des paramètres de surface).

CONCLUSION GENERALE

L'objectif général des travaux de thèse était d'évaluer l'apport des données satellites radar, acquises par TerraSAR-X, Radarsat-2 et Alos (dans les bandes spectrales X, C et L), en complément des données optiques (Formosat-2, Spot-4/5), pour le suivi de cinq cultures (blé, colza, soja, tournesol et maïs). Ces travaux nécessitaient l'acquisition de données satellites et terrain (Chapitre I), afin d'analyser la sensibilité des données radar durant la période végétative (Chapitre II), et d'évaluer différents modèles électromagnétique du sol nu (Chapitre III).

La campagne expérimentale *MCM'10*, menée durant la première année de thèse, a permis de constituer une base de données à la fois unique et indispensable pour l'étude des agrosystèmes. Avec pour principaux points forts : des acquisitions satellites variées (vis-à-vis des capteurs mis en œuvres), combinées à des collectes synchrones de nombreux paramètres de surface (avec des protocoles cohérents pour l'étude d'une zone agricole), la base de données ainsi constituée offre des possibilités d'analyse dépassant la cadre limité de cette thèse, et devrait permettre de répondre à de nombreuses questions restées en suspens dans de précédents travaux.

Les séries d'images constituées dans le domaine des micro-ondes, durant la quasi-intégralité d'une saison agricole, couvrent avec exhaustivité les conditions de surface pouvant être observées au sein de la région d'étude. Les produits satellites ont été délivrés, à haute résolution spatiale, par TerraSAR-X, Radarsat-2 et Alos, dans les bandes spectrales X, C et L. A ces acquisitions s'ajoutent celles réalisées dans l'optique (Formosat-2, Spot-4/5) et le thermique (Landsat-5/7), programmées dans le cadre d'autres projets du laboratoire CESBIO. Au final, une même zone d'étude a été suivie régulièrement, autorisant la mise en place d'approches multi-capteurs (comme celles évoquées dans cette thèse), ou multi-indices en dérivant de nouveaux paramètres sur la base des images radars, par le biais de décompositions polarimétriques ou interférométriques. D'autre part, ces séries d'images, couplées aux acquisitions systématiques à basse résolution (SMOS, AMSR-E, ASCAT), devraient également permettre d'évaluer des méthodes de changement d'échelle spatiale (agrégation/désagrégation des données).

Les protocoles mis en œuvres pour la collecte des mesures terrains ont permis de caractériser séparément les compartiments sol (avec l'humidité de surface, la rugosité ou la texture), et végétation (avec la hauteur, les stades phénologique ou la biomasse), ainsi que les pratiques culturales. Le site d'étude a été caractérisé à l'échelle d'un grand nombre de parcelles, en s'appuyant sur deux approches complémentaires (qualitative et

quantitative), à la différence de la plupart des études publiées, uniquement basées sur un nombre limité de parcelles. Outre les analyses présentées dans les Chapitres II et III, cette masse de vérités terrains devraient permettre la mise en place d'études novatrices dans un futur proche, comme par exemple : le développement de nouveaux modèles de croissance de la végétation (décrivant la répartition verticale de biomasse dans le couvert végétal), ou l'analyse de l'humidité de surface à différentes échelles (avec l'étude de la variabilité intra-parcellaire à régionale), en lien avec les différents produits satellitaires cités précédemment.

Le chapitre II a permis de définir la sensibilité des données micro-ondes pendant le cycle phénologique des principales cultures de la zone d'étude (blé, colza, maïs, tournesol, et soja).

Les signatures temporelles radar ont été normalisées, en s'appuyant sur l'utilisation conjointe des données radar et optiques. Cette méthode a permis de s'affranchir de la dépendance angulaire des images SAR, sur la seule base de données satellites. Avec l'émergence de nouvelles missions, comme par exemple Sentinel (où images optique et radar seront acquises régulièrement), cette méthode devrait permettre d'accroître les possibilités de suivi d'une même zone géographique, quelque soit l'angle de visée du capteur.

Les analyses diachroniques ont mis en évidence les fréquences, et polarisations judicieuses pour le suivi des cultures. Ainsi, la bande X avec la polarisation HH apparaît judicieuse pour le suivi du blé, alors que le colza et le maïs montrent d'intéressantes dynamiques en bande C avec la polarisation croisée (VH ou HV). Enfin, les différentes polarisations en bande C présentent des variations utiles pour le suivi du tournesol et du soja. Dans le cas de la bande L, même si les analyses restent limitées (en comparaison aux autres fréquences), les comportements observés sont prometteurs, et méritent de nouvelles études avec l'arrivée du satellite Alos-2. D'autre part, l'analyse des séries temporelles a clairement mis en évidence certains stades de développement des cultures, comme : l'élongation des tiges, la floraison, la fructification, la sénescence, la récolte, ou les événements de verse. Le développement de méthodes de détection automatique de ces événements devrait permettre d'améliorer les possibilités de suivi des cultures, et la prévision des rendements.

La sensibilité des signaux satellites vis-à-vis des paramètres des cultures a été analysée. Chacune des configurations disponibles a été confrontée à l'indice foliaire et à la hauteur des cultures, afin de quantifier les possibilités d'estimation de ces variables. Outre les résultats prometteurs offerts par les données SAR, ces travaux sur les cultures devraient permettre l'assimilation des signaux radar dans des modèles agro-météorologiques, en complément des données optiques.

Des études similaires sur la base de différents indices extraits des données radar (indices polarimétriques et interférométriques), devraient enrichir les possibilités de suivi des cultures.

Le chapitre III a permis d'évaluer les modèles les plus couramment utilisés dans le domaine des micro-ondes, à savoir : les modèles de Dubois, d'Oh (1992 et 2004) et l'Integral Equation Model, sur un jeu de données indépendant de leur mise en place, cohérent (vis-à-vis des protocoles mis en œuvre), et exhaustif quant aux conditions de surface (larges gammes d'humidité, de rugosité et de texture) et aux configurations satellites (acquisitions en bandes X, C et L).

Les travaux ont mis en évidence les limites de ces différentes approches, et le soin particulier à porter à la collecte des mesures (concernant l'humidité de surface et la rugosité). En bandes X et C, les approches semi-

empiriques présentent les meilleurs résultats, comparables à ceux présentés dans la littérature. En bande L, approches empirique et physique présentent des résultats comparables.

Une amélioration des modèles a ensuite été proposée, en s'appuyant sur l'analyse des résidus de simulation. Outre les gains en terme de performances statistiques (augmentation de la corrélation et diminution de l'erreur entre les signaux SAR observés et simulés), les domaines de validité des modèles empiriques ont été étendus en bandes X et C, vis-à-vis des conditions d'humidité et de rugosité de surface.

Une perspective aux travaux de modélisation serait d'analyser les effets des modifications des modèles sur l'inversion des paramètres de surface. Une autre voie consisterait à combiner les différentes approches testées, et les modifications proposées, afin de mettre en place un nouveau modèle.

Ces travaux devraient être pérennisés avec la préparation des futures missions spatiales comme Sentinel, Tandem-X, Tandem-L, Radarsat Constellation, ou Alos-2.

Références Bibliographiques

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 328.
- Altese, E., Bolognani, O., Mancini, M. and Troch, P.A., 1996. Retrieving Soil Moisture Over Bare Soil from ERS 1 Synthetic Aperture Radar Data: Sensitivity Analysis Based on a Theoretical Surface Scattering Model and Field Data. *Water Resources Research*, 32(3): 653-661.
- Anguela, T.P., Zribi, M., Baghdadi, N. and Loumagne, C., 2010. Analysis of Local Variation of Soil Surface Parameters With TerraSAR-X Radar Data Over Bare Agricultural Fields. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 48(2): 874-881.
- Arnaud, M. and Leroy, M., 1991. SPOT 4: a new generation of SPOT satellites. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 46(4): 205-215.
- Attema, E.P.W. and Ulaby, F.T., 1978. Vegetation modeled as a water cloud. *Radio Sci.*, 13(2): 357-364.
- Bach, H. et al., 2012. Integrative use of multitemporal rapideye and TerraSAR-X data for agricultural monitoring. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2012 IEEE International, pp. 3748-3751.
- Baghdadi, N., Boyer, N., Todoroff, P., El Hajj, M. and Bégué, A., 2009. Potential of SAR sensors TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS for monitoring sugarcane crops on Reunion Island. *Remote Sensing of Environment*, 113(8): 1724-1738.
- Baghdadi, N., Chaaya, J.A. and Zribi, M., 2011a. Semiempirical Calibration of the Integral Equation Model for SAR Data in C-Band and Cross Polarization Using Radar Images and Field Measurements. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 8(1): 14-18.
- Baghdadi, N. et al., 2004. Semi-empirical calibration of the IEM backscattering model using radar images and moisture and roughness field measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 25(18): 3593-3623.
- Baghdadi, N., Holah, N. and Zribi, M., 2006a. Calibration of the Integral Equation Model for SAR data in C-band and HH and VV polarizations. *International Journal of Remote Sensing*, 27(4): 805-816.
- Baghdadi, N., Holah, N. and Zribi, M., 2006b. Soil moisture estimation using multi-incidence and multi-polarization ASAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 27(10): 1907-1920.
- Baghdadi, N., King, C., Chanzy, A. and Wigneron, J.P., 2002. An empirical calibration of the integral equation model based on SAR data, soil moisture and surface roughness measurement over bare soils. *International Journal of Remote Sensing*, 23(20): 4325-4340.
- Baghdadi, N., Saba, E., Aubert, M., Zribi, M. and Baup, F., 2011b. Evaluation of Radar Backscattering Models IEM, Oh, and Dubois for SAR Data in X-Band Over Bare Soils. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 8(6): 1160-1164.
- Baghdadi, N. and Zribi, M., 2006. Evaluation of radar backscatter models IEM, OH and Dubois using experimental observations. *International Journal of Remote Sensing*, 27(18): 3831-3852.
- Baghdadi, N., Zribi, M., Loumagne, C.c., Ansart, P. and Anguela, T.P., 2008. Analysis of TerraSAR-X data and their sensitivity to soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote Sensing of Environment*, 112(12): 4370-4379.
- Baillarin, S., Gigord, P. and Hagolle, O., 2008. Automatic Registration of Optical Images, a Stake for Future Missions: Application to Ortho-Rectification, Time Series and Mosaic Products, *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2008. *IGARSS 2008. IEEE International*, pp. II-1112-II-1115.

- Balenzano, A., Mattia, F., Satalino, G. and Davidson, M.W.J., 2011. Dense Temporal Series of C- and L-band SAR Data for Soil Moisture Retrieval Over Agricultural Crops. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, IEEE Journal of, 4(2): 439-450.
- Ballester-Berman, J.D. and Lopez-Sanchez, J.M., 2012. Time Series of Hybrid-Polarity Parameters Over Agricultural Crops. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, 9(1): 139-143.
- Baret, F. and Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35(2&3): 161-173.
- Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J. and Makin, I.W., 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*, 46(2): 137-155.
- Baup, F. et al., 2010. Surface soil moisture mapping at high spatial resolution over agricultural bare soils by using TERRASAR-X and FORMOSAT-2 data., EGU, Vienna, Austria.
- Baup, F. et al., 2012. MCM'10: An experiment for satellite multi-sensors crop monitoring from high to low resolution observations, *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2012 IEEE International, pp. 4849-4852.
- Besse, S., 2004. ÉTUDE THÉORIQUE DE RADARS GÉOLOGIQUES : analyses de sols, d'antennes et interprétation des signaux, UNIVERSITÉ DE LIMOGES, 206 pp.
- Béziat, P., Ceschia, E. and Dedieu, G., 2009. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(10): 1628-1645.
- Bouman, B.A.M., 1991. Crop parameter estimation from ground-based x-band (3-cm wave) radar backscattering data. *Remote Sensing of Environment*, 37(3): 193-205.
- Bouman, B.A.M. and van Kasteren, H.W.J., 1990. Ground-based X-band (3-cm wave) radar backscattering of agricultural crops. II. Wheat, barley, and oats; the impact of canopy structure. *Remote Sensing of Environment*, 34(2): 107-119.
- Brakke, T.W., Kanemasu, E.T., Steiner, J.L., Ulaby, F.T. and Wilson, E., 1981. Microwave radar response to canopy moisture, leaf-area index, and dry weight of wheat, corn, and sorghum. *Remote Sensing of Environment*, 11(0): 207-220.
- Breit, H. et al., 2010. TerraSAR-X SAR Processing and Products. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on, 48(2): 727-740.
- Brown et al., 2003a. High-resolution measurements of scattering in wheat canopies: Implications for crop parameter retrieval. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, New York, NY, ETATS-UNIS, 9 pp.
- Brown, S.C.M., Quegan, S., Morrison, K., Bennett, J.C. and Cookmartin, G., 2003b. High-resolution measurements of scattering in wheat canopies-implications for crop parameter retrieval. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on, 41(7): 1602-1610.
- Callens, M., Verhoest, N.E.C. and Davidson, M.W.J., 2006. Parameterization of tillage-induced single-scale soil roughness from 4-m profiles. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on, 44(4): 878-888.
- Calvet, R., 2003. *Le Sol - Propriétés et fonctions - Tome 2 – Phénomènes physiques et chimiques – Applications agronomiques et environnementales*. Dunod
- Ceschia, E. et al., 2010. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(3): 363-383.
- Champion, I. and Faivre, R., 1997. Sensitivity of the radar signal to soil moisture: variation with incidence angle, frequency, and polarization. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on, 35(3): 781-783.

- Chern, J.-S., Ling, J. and Weng, S.-L., 2008. Taiwan's second remote sensing satellite. *Acta Astronautica*, 63(11â€“12): 1305-1311.
- Claverie, M. et al., 2012. Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using high spatial and temporal resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 124(0): 844-857.
- Claverie, M. et al., 2013. Validation of coarse spatial resolution LAI and FAPAR time series over cropland in southwest France. *Remote Sensing of Environment*, 139(0): 216-230.
- Cookmartin, G. et al., 2000. Modeling microwave interactions with crops and comparison with ERS-2 SAR observations. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 38(2): 658-670.
- Dabrowska-Zielinska, K., Inoue, Y., Kowalik, W. and Gruszczynska, M., 2007. Inferring the effect of plant and soil variables on C- and L-band SAR backscatter over agricultural fields, based on model analysis. *Advances in Space Research*, 39(1): 139-148.
- Davidson, M., Le Toan, T., Borgeaud, M. and Manninen, T., 1998. Measuring the roughness characteristics of natural surfaces at pixel scales: moving from 1 metre to 25 metre profiles, *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS '98. 1998 IEEE International*, pp. 1200-1202 vol.3.
- Davidson, M.W.J. et al., 2000. On the characterization of agricultural soil roughness for radar remote sensing studies. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 38(2): 630-640.
- Dejoux, J.F. et al., 2012. Kalideos OSR MiPy : un observatoire pour la recherche et la démonstration des applications de la télédétection a la gestion des territoires. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 197: 17-30.
- Dente, L., Satalino, G., Mattia, F. and Rinaldi, M., 2008. Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES-Wheat model to map wheat yield. *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1395-1407.
- Dobson, M.C. and Ulaby, F., 1981. Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture, And Soil Texture: Part III-Soil Tension. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, GE-19(1): 51-61.
- Dore, M.H.I., 2005. Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? *Environment International*, 31(8): 1167-1181.
- Dubois, P.C., van Zyl, J. and Engman, T., 1995. Measuring soil moisture with imaging radars. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 33(4): 915-926.
- Duchemin, B. et al., 2006. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, 79(1): 1-27.
- Engdahl, M.E., Borgeaud, M. and Rast, M., 2001. The use of ERS-1/2 Tandem interferometric coherence in the estimation of agricultural crop heights. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 39(8): 1799-1806.
- Falloon, P. and Betts, R., 2010. Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation-The importance of an integrated approach. *Science of The Total Environment*, 408(23): 5667-5687.
- Fieuzal, R., Baup, F. and Marais-Sicre, C., 2013. Monitoring Wheat and Rapeseed by Using Synchronous Optical and Radar Satellite Data—From Temporal Signatures to Crop Parameters Estimation. *Advances in Remote Sensing*, 2(2): 162-180.
- Fieuzal, R. et al., 2011. Combined use of optical and radar satellite data for the monitoring of irrigation and soil moisture of wheat crops. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4): 1117-1129.

- Fritz, T. et al., 2007. TerraSAR-X Ground Segment Level 1b Product Format Specification. (1.3): 257.
- Fritz, T. et al., 2008. TerraSAR-X Ground Segment Basic Product Specification Document. (1.5): 103.
- Fung, A.K., Li, Z. and Chen, K.S., 1992. Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 30(2): 356-369.
- Gherboudj, I., Magagi, R., Berg, A.A. and Toth, B., 2011. Soil moisture retrieval over agricultural fields from multi-polarized and multi-angular RADARSAT-2 SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 115(1): 33-43.
- Goulard, F., Arama, Y. and Amen, J.F., 2011. Compte rendu de l'atelier "précision des scenarios de l'agriculture". 21.
- Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J. and Strachan, I.B., 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90(3): 337-352.
- Hadria, R. et al., 2009. Combined use of optical and radar satellite data for the detection of tillage and irrigation operations: Case study in Central Morocco. *Agricultural Water Management*, 96(7): 1120-1127.
- Hadria, R. et al., 2010. Potentiality of optical and radar satellite data at high spatio-temporal resolutions for the monitoring of irrigated wheat crops in Morocco. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, Supplement 1(0): S32-S37.
- Hagolle, O. et al., 2008. Correction of aerosol effects on multi-temporal images acquired with constant viewing angles: Application to Formosat-2 images. *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1689-1701.
- Hallikainen, M.T., Ulaby, F.T., Dobson, M.C., El-Rayes, M.A. and Lil-Kun, W., 1985. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, GE-23(1): 25-34.
- Hansen, E.M. and Djurhuus, J., 1997. Nitrate leaching as influenced by soil tillage and catch crop. *Soil and Tillage Research*, 41(3&4): 203-219.
- Inoue, Y. et al., 2002. Season-long daily measurements of multifrequency (Ka, Ku, X, C, and L) and full-polarization backscatter signatures over paddy rice field and their relationship with biological variables. *Remote Sensing of Environment*, 81(2&3): 194-204.
- Jackson, T.J., McNairn, H., Wertz, M.A., Brisco, B. and Brown, R., 1997. First order surface roughness correction of active microwave observations for estimating soil moisture. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 35(4): 1065-1069.
- Jiao, X., McNairn, H., Shang, J. and Liu, J., 2010. The sensitivity of multi-frequency (X, C and L-band) radar backscatter signatures to bio-physical variables (LAI) over corn and soybean fields, *ISPRS TC VII Symposium - 100 Years ISPRS*, Vienna, Austria.
- Joseph, A.T., van der Velde, R., O'Neill, P.E., Lang, R. and Gish, T., 2010. Effects of corn on C- and L-band radar backscatter: A correction method for soil moisture retrieval. *Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2417-2430.
- Kalluri, S., Gilruth, P. and Bergman, R., 2003. The potential of remote sensing data for decision makers at the state, local and tribal level: experiences from NASA's Synergy program. *Environmental Science & Policy*, 6(6): 487-500.
- Kane, Y., 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 14(3): 302-307.
- Karam, M.A., Fung, A.K., Lang, R.H. and Chauhan, N.S., 1992. A microwave scattering model for layered vegetation. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 30(4): 767-784.

- Larranaga, A., Alvarez-Mozos, J., Albizua, L. and Peters, J., 2013. Backscattering Behavior of Rain-Fed Crops Along the Growing Season. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 10(2): 386-390.
- Latouche, R., 1967. *Etudes médiévales : le haut moyen Age. La France de l'Ouest. Des Pyrénées aux Alpes. Cahiers de civilisation médiévale*: 486-486.
- Lavalle, M. and Wright, T., 2009. Absolute Radiometric and Polarimetric Calibration of ALOS PALSAR Products. (1): 18.
- Le Hegarat-Masclé, S., Zribi, M., Alem, F., Weisse, A. and Loumagne, C., 2002. Soil moisture estimation from ERS/SAR data: toward an operational methodology. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40(12): 2647-2658.
- Lievens, H. and Verhoest, N.E.C., 2011. On the Retrieval of Soil Moisture in Wheat Fields From L-Band SAR Based on Water Cloud Modeling, the IEM, and Effective Roughness Parameters. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 8(4): 740-744.
- Liu, J. et al., 2009. Quantifying Crop Biomass Accumulation Using Multi-temporal Optical Remote Sensing Observations, 30th Canadian Symposium on Remote Sensing / 30e Symposium canadien sur la télédétection, Lethbridge, AB, Canada.
- Macelloni, G., Paloscia, S., Pampaloni, P., Marliani, F. and Gai, M., 2001. The relationship between the backscattering coefficient and the biomass of narrow and broad leaf crops. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 39(4): 873-884.
- Maître, H., 2001. *Traitement des images RSO*. Hermes Science, Paris.
- Mangiarotti, S. et al., 2008. Evolutionary bi-objective optimization of a semi-arid vegetation dynamics model with NDVI and backscattering coefficient satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1365-1380.
- Marais-Sicre, C., Baup, F., and Fieuzal, R., "Mapping the crop row direction by using Formosat-2 panchromatic images", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 94, pp. 127-142, 2014.
- Mattia, F. et al., 2003. Multitemporal C-band radar measurements on wheat fields. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 41(7): 1551-1560.
- Mattia, F. et al., 1997. The effect of surface roughness on multifrequency polarimetric SAR data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 35(4): 954-966.
- McNairn, H., Jiali, S., Xianfeng, J. and Champagne, C., 2009. The Contribution of ALOS PALSAR Multipolarization and Polarimetric Data to Crop Classification. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 47(12): 3981-3992.
- McNairn, H., Merzouki, A., Pacheco, A. and Fitzmaurice, J., 2012. Monitoring Soil Moisture to Support Risk Reduction for the Agriculture Sector Using RADARSAT-2. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*, 5(3): 824-834.
- MDA, 2000. RADARSAT Data Product Specification. (RSI-GS-026): 129.
- Meier, U., 2001. *Stades phénologiques des mono-et dicotylédones cultivées*. Centre Fédéral de Recherches Biologiques pour l'Agriculture et les Forêts.
- Mingam, B., 2010. *Analyse des signaux radar multifréquences (bande L,C,X) sur zone agricole*, CESBIO, Toulouse.
- Mingquan, J., Ling, T., Yan, C. and Junming, G., 2012. Multi-temporal radar backscattering measurement of wheat fields and their relationship with biological variables, *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*, pp. 4590-4593.

- Monsivais-Huertero, A. and Judge, J., 2011. Comparison of Backscattering Models at L-Band for Growing Corn. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 8(1): 24-28.
- Moran, M.S. et al., 2012. A RADARSAT-2 Quad-Polarized Time Series for Monitoring Crop and Soil Conditions in Barrax, Spain. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 50(4): 1057-1070.
- Moran, M.S., Vidal, A., Troufleau, D., Inoue, Y. and Mitchell, T.A., 1998. Ku- and C-band SAR for discriminating agricultural crop and soil conditions. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 36(1): 265-272.
- Morena, L.C., James, K.V. and Beck, J., 2004. An introduction to the RADARSAT-2 mission. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(3): 221-234.
- Oh, Y., 2000. Retrieval of the effective soil moisture contents as a ground truth from natural soil surfaces, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International*, pp. 1702-1704 vol.4.
- Oh, Y., 2004. Quantitative retrieval of soil moisture content and surface roughness from multipolarized radar observations of bare soil surfaces. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 42(3): 596-601.
- Oh, Y., Sarabandi, K. and Ulaby, F.T., 1992. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 30(2): 370-381.
- Oh, Y., Sarabandi, K. and Ulaby, F.T., 2002. Semi-empirical model of the ensemble-averaged differential Mueller matrix for microwave backscattering from bare soil surfaces. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40(6): 1348-1355.
- Olesen, J.E. and Bindi, M., 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, 16(4): 239-262.
- Olesen, J.E. et al., 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34(2): 96-112.
- Paloscia, S., Pampaloni, P., Pettinato, S. and Santi, E., 2008. A Comparison of Algorithms for Retrieving Soil Moisture from ENVISAT/ASAR Images. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 46(10): 3274-3284.
- Picard, G., Le Toan, T. and Mattia, F., 2003. Understanding C-band radar backscatter from wheat canopy using a multiple-scattering coherent model. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 41(7): 1583-1591.
- Prasad, R., 2009. Retrieval of crop variables with field-based X-band microwave remote sensing of ladyfinger. *Advances in Space Research*, 43(9): 1356-1363.
- Rahman, M.M. et al., 2008. Mapping surface roughness and soil moisture using multi-angle radar imagery without ancillary data. *Remote Sensing of Environment*, 112(2): 391-402.
- Richards, J.A., 2008. *Radio Wave Propagation, An Introduction for the Non-Specialist*. Springer, Berlin.
- Richer de Forges, A., Feller, C., Jamagne, M. and Arrouays, D., 2008. Perdus dans le triangle des textures. *Etude et Gestion des Sols*, 15(2): 97-111.
- Rosenqvist, A., Shimada, M., Ito, N. and Watanabe, M., 2007. ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of the Environment. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 45(11): 3307-3316.

- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. and Harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation.
- Satalino, G. et al., 2002. On current limits of soil moisture retrieval from ERS-SAR data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40(11): 2438-2447.
- Seelan, S.K., Laguet, S., Casady, G.M. and Seielstad, G.A., 2003. Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing of Environment*, 88(1&2): 157-169.
- Shang, J., McNairn, H., Champagne, C. and Xianfeng, J., 2008. Contribution of Multi-Frequency, Multi-Sensor, and Multi-Temporal Radar Data to Operational Annual Crop Mapping, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International*, pp. III - 378-III - 381.
- Skriver, H., Svendsen, M.T. and Thomsen, A.G., 1999. Multitemporal C- and L-band polarimetric signatures of crops. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 37(5): 2413-2429.
- Talleg, T., Béziat, P., Jarosz, N., Rivalland, V. and Ceschia, E., 2013. Crops' water use efficiencies in temperate climate: Comparison of stand, ecosystem and agronomical approaches. *Agricultural and Forest Meteorology*, 168(0): 69-81.
- Tucker, C.J., 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
- Ulaby, F., Bush, T. and Batlivala, P., 1975. Radar response to vegetation II: 8-18 GHz band. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 23(5): 608-618.
- Ulaby, F.T., Allen, C.T., Eger III, G. and Kanemasu, E., 1984. Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 14(1&2): 113-133.
- Ulaby, F.T. and Batlivala, P.P., 1976. Optimum Radar Parameters for Mapping Soil Moisture. *Geoscience Electronics, IEEE Transactions on*, 14(2): 81-93.
- Ulaby, F.T., Batlivala, P.P. and Dobson, M.C., 1978. Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture, and Soil Texture: Part I-Bare Soil. *Geoscience Electronics, IEEE Transactions on*, 16(4): 286-295.
- Ulaby, F.T., Bradley, G.A. and Dobson, M.C., 1979. Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture, and Soil Texture: Part II-Vegetation-Covered Soil. *Geoscience Electronics, IEEE Transactions on*, 17(2): 33-40.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A.K., 1981. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume I, Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A.K., 1982. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume II, Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A.K., 1986. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume III, From Theory to Application*. Dedham, MA.: Artech House.
- Ward, P.R., Flower, K.C., Cordingley, N., Weeks, C. and Micin, S.F., 2012. Soil water balance with cover crops and conservation agriculture in a Mediterranean climate. *Field Crops Research*, 132(0): 33-39.
- Wegmuller, U. et al., 1994. Active and passive microwave signature catalog on bare soil (2-12 GHz). *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 32(3): 698-702.
- Weiss, M. et al., 2002. Validation of neural net techniques to estimate canopy biophysical variables from remote sensing data. *Agronomie*, 22: 547-553.
- Zobeck, T.M. and Popham, T.W., 1997. Modification of the wind erosion roughness index by rainfall. *Soil and Tillage Research*, 42(1&2): 47-61.

- Zribi, M., Baghdadi, N., Holah, N. and Fafin, O., 2005a. New methodology for soil surface moisture estimation and its application to ENVISAT-ASAR multi-incidence data inversion. *Remote Sensing of Environment*, 96(3&4): 485-496.
- Zribi, M., Baghdadi, N., Holah, N., Fafin, O. and Guérin, C., 2005b. Evaluation of a rough soil surface description with ASAR-ENVISAT radar data. *Remote Sensing of Environment*, 95(1): 67-76.
- Zribi, M., Baghdadi, N., Holah, N., Fafin, O. and Guérin, C., 2005c. Evaluation of a rough soil surface description with ASAR-ENVISAT radar data. *Remote Sensing of Environment*, 95(1): 67-76.
- Zribi, M. and Dechambre, M., 2002. A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from C-band radar data. *Remote Sensing of Environment*, 84(1): 42-52.
- Zribi, M. and Dechambre, M., 2003. A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from C-band radar data. *Remote Sensing of Environment*, 84(1): 42-52.

Valorisations Scientifiques

1. ARTICLES EN LIEN AVEC LES THÉMATIQUES DE LA THÈSE

1.1. Articles publiés :

- [4] C. Marais-Sicre, F. Baup, R. Fieuzal, "Mapping the crop row direction by using Formosat-2 panchromatic images", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 94, pp. 127–142, 2014.
- [3] R. Fieuzal, F. Baup and C. Marais-Sicre, "Monitoring Wheat and Rapeseed by Using Synchronous Optical and Radar Satellite Data—From Temporal Signatures to Crop Parameters Estimation," *Advances in Remote Sensing*, Vol. 2 No. 2, 2013, pp. 162-180.
- [2] M. Claverie, V. Demarez, B. Duchemin, O. Hagolle, D. Ducrot, C. Marais-Sicre, J.-F. Dejoux, M. Huc, P. Keravec, P. Béziat, R. Fieuzal, E. Ceschia, and G. Dedieu, "Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using high spatial and temporal resolution remote sensing data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 124, pp. 844-857, 2012.
- [1] R. Fieuzal, B. Duchemin, L. Jarlan, M. Zribi, F. Baup, O. Merlin, O. Hagolle, and J. Garatuza-Payan, "Combined use of optical and radar satellite data for the monitoring of irrigation and soil moisture of wheat crops," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 15, pp. 1117-1129, 2011.

1.2. Actes étendus :

- [2] F. Baup, R. Fieuzal, C. Marais-Sicre, J. F. Dejoux, V. le Dantec, P. Mordelet, M. Claverie, O. Hagolle, A. Lopes, P. Keravec, E. Ceschia, A. Mialon, and R. Kidd, "MCM'10: An experiment for satellite multi-sensors crop monitoring from high to low resolution observations," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2012 IEEE International, 2012, pp. 4849-4852.
- [1] R. Fieuzal, F. Baup, and C. Marais-Sicre, "Sensitivity of TerraSAR-X, RADARSAT-2 and ALOS satellite radar data to crop variables," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2012 IEEE International, 2012, pp. 3740-3743.

2. ARTICLES EN COOPÉRATION AVEC D'AUTRES PROJETS

2.1. Articles publiés :

[3] Y. Soldo, F. Cabot, A. Khazaal, M. Miernecki, E. Slominska, R. Fieuzal, Y. H. Kerr, "Localization of RFI Sources for the SMOS Mission: A Means for Assessing SMOS Pointing Performances", *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*, vol. 99, pp.1-11, 2014.

[2] J. Chirouze, G. Boulet, L. Jarlan, R. Fieuzal, J. C. Rodriguez, J. Ezzahar, S. Er-Raki, G. Bigeard, O. Merlin, J. Garatuza-Payan, C. Watts, and G. Chehbouni, "Inter-comparison of four remote sensing based surface energy balance methods to retrieve surface evapotranspiration and water stress of irrigated fields in semi-arid climate," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 18, pp. 1165-1188, 2014.

[1] D. J. Leroux, Y. H. Kerr, P. Richaume, and R. Fieuzal, "Spatial distribution and possible sources of SMOS errors at the global scale," *Remote Sensing of Environment*, vol. 133, pp. 240-250, 2013.

2.2. Acte étendu :

[1] Y. Soldo, A. Khazaal, E. Słomińska, F. Cabot, R. Fieuzal and Y. H. Kerr, "Monitoring of RFI localizations for the SMOS mission: seasonal variations and systematic errors" , in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2013 IEEE International, 2013,.

3. AUTRES VALORISATIONS SCIENTIFIQUES

3.1. Présentations avec acte :

[3] F. Baup, R. Fieuzal, B. Mingam, A. Lopes, R. Fjortoff, C. Marais-Sicre, J.-F. Dejoux, M. Zribi, N. Baghdadi, and E. Ceschia, "Contribution of Alos, Radarsat-2 and TerraSAR-X radar data for monitoring agricultural surfaces," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012 IEEE International, IGARSS 2012 Vancouver, Canada*, 2011.

[2] R. Fieuzal, F. Baup, C. Marais-Sicre, J.F. Dejoux, V. Le Dantec, P. Mordelet, A. Lopes, M. Claverie, V. Demarez, P. Keravec, E. Ceschia, "Overview and first results of the Multispectral Crop Monitoring (MCM'10) experiment", *FLUXPYR Workshop*, 26-27 May 2011.

[1] R. Fieuzal, F. Baup, C. Marais-Sicre, J.F. Dejoux, V. Le Dantec, P. Mordelet, A. Lopes, M. Claverie, V. Demarez, P. Keravec, E. Ceschia, "Radar signatures of crops using X-, C- and L-band satellites data", *AGRISAR Workshop*, 16-18 May 2011.

3.2. Posters avec acte :

- [13] F. Baup, R. Fieuzal, C. Marais-Sicre, J.F. Dejoux, V. le Dantec, P. Mordelet, M. Claverie, V. Demarez, O. Hagolle, A. Lopes, P. Keravec, E. Ceschia, A. Mialon, R. Kidd, "MCM'10: An Experiment for satellite Multispectral Crop Monitoring. From high to low resolution observations", EGU Vienna, 22-27 April 2012.
- [12] F. Baup, L. Villa, R. Fieuzal, "Sensitivity of TerraSAR-X interferometric data during crop growing season", EGU Vienna, 22-27 April 2012.
- [11] F. Baup, S. Flanquart, C. Marais-Sicre, R. Fieuzal, "Satellite monitoring at high spatial resolution of water bodies used for irrigation purposes", EGU Vienna, 22-27 April 2012.
- [10] C. Marais-Sicre, F. Baup, R. Fieuzal, "Mapping the crop row direction by using Formosat-2 panchromatic images", EGU Vienna, 22-27 April 2012.
- [9] R. Fieuzal, F. Baup, C. Marais-Sicre, "Radar data sensitivity to crops using TerraSAR-X, Radarsat-2 and Alos satellite data", EGU Vienna, 22-27 April 2012.
- [8] J. Chirouze, G. Boulet, P. Béziat, L. Jarlan, R. Fieuzal, J. Garatuza-Payan, C. Watts, J.C. Rodriguez, J. Ezzahar, S. Er-Raki, G. Chehbouni, "Retrieval of distributed irrigation scenarios with a SVAT model (ICARE) based on high and low resolution thermal data (ASTER, MODIS) - Methodology and preliminary results", EGU Vienna, 22-27 April 2012.
- [7] M. Claverie, V. Demarez, B. Duchemin, O. Hagolle, J.F. Dejoux, P. Keravec, R. Fieuzal, E. Ceschia, M. Weiss, F. Baret, G. Dedieu, "Estimation Of Crops Biomass And Evapotranspiration From FORMOSAT-2 Time series Data" Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, 3d colloquium, Valencia, 30 sept-03 oct 2010.
- [6] J. Chirouze, G. Boulet, P. Béziat, L. Jarlan, R. Fieuzal, J. Garatuza-Payan, C. Watts, J.C. Rodriguez, J. Ezzahar, S. Er-Raki, G. Chehbouni, "Performance assessment of four surface energy budget models, forced with in-situ and ASTER surface temperature, against eddycovariance and scintillometer data in temperate and semi-arid regions", Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, 3d colloquium, Valencia, 30 sept-03 oct 2010, pp. 388-392.
- [5] R. Fieuzal, F. Baup, B. Mingam, C. Marais-Sicre, J.F. Dejoux, V. Le Dantec, P. Mordelet, P. Béziat, A. Lopes, M. Claverie, V. Demarez, E. Ceschia, "Contribution of RADARSAT-2, ALOS and TERRASAR-X for monitoring agricultural surfaces", RADARSAT-2 Workshop, CSA, September 27 to October 1 2010.
- [4] B. Duchemin, R. Fieuzal, E. Rafaël-Perez, M. Rivera, R. Hadria, S. Er-Raki, J. Ezzahar, G. Boulet, L. Jarlan, B. Mougenot, S. Khabba, M. Zribi, F. Baup, I. Benhadj, J. Garatuza-Payan, O. Hagolle, A. Oliso, V.

Simonneaux, A. Chehbouni, “Observation spatiale à hautes résolutions spatiale et temporelle pour le suivi des ressources hydro-agricoles en milieu semi-aride”, Journées d’Animation Scientifique (JAS09) de l’AUF Alger Novembre 2009.

[3] R. Fieuzal, B. Duchemin, L. Jarlan, F. Baup, M.A. Rivera, E.R. Perez-Ruiz, J. Garatuza-Payan, G. Boulet, M. Zribi, R. Hadria, O. Hagolle, T. Le Toan, G. Chehbouni, “Potential of ENVISAT/ASAR time series for the monitoring of surface vegetation and soil changes in irrigated arid croplands: case study in the Yaqui Valley (Sonora, Mexico)”, ESA, 18-20 November 2009.

[2] M. Claverie, V. Demarez, B. Duchemin, R. Fieuzal, O. Hagolle, P. Keravec, B. Marciel, E. Ceschia, J.F. Dejoux, G. Dedieu, “Spatialization of crop leaf area index and biomass by combining a simple crop model SAFY and high spatial and temporal resolutions remote sensing data”, IGARSS, 12-17 July 2009.

[1] V. Demarez, F. Maire, R. Fieuzal, B. Duchemin, O. Hagolle, D. Ducrot, P. Beziat, B. Marciel, P. Keravec, H. Gibrin, J.F. Dejoux, E. Ceschia, “Upscaling LAI, Biomass and Evapotranspiration for crops - Towards regional scale”, CarboEurope, 2008.

3.3. Posters :

[5] F. Baup, R. Fieuzal, C. Marais-Sicre, J.F. Dejoux, V. le Dantec, P. Mordelet, M. Claverie, V. Demarez, O. Hagolle, A. Lopes, P. Keravec, E. Ceschia, A. Mialon, R. Kidd, “MCM'10: An Experiment for satellite Multispectral Crop Monitoring - From high to low resolution observations”, Pleiades days –ORFEO, Toulouse, France, January -2012.

[4] F. Baup, L. Villa, R. Fieuzal, “Crop monitoring by using Terrasar X interferometric data - Towards the use of COSMO-skymed images”, Pleiades days –ORFEO, Toulouse, France, January -2012.

[3] F. Baup, S. Flanquart, R. Fieuzal, C. Marais-Sicre, “Satellite monitoring at high spatial resolution of water bodies used for irrigation purposes”, Pleiades days –ORFEO, Toulouse, France, January -2012.

[2] C. Marais-Sicre, F. Baup, R. Fieuzal, “Mapping the crop row direction by using Formosat-2 panchromatic images”, Pleiades days –ORFEO, Toulouse, France, January -2012.

[1] D. Leroux, P. Richaume, Y. Kerr, R. Fieuzal, “Multiple global triple collocation”, SMOS workshop 27th –29th September, 2011 Arles, France.